

Resumen

El siguiente proyecto pretende establecer la especificación técnica de un ensayo de vida acelerada de multiplicadoras de aerogeneradores, con el propósito de simular, en un banco dinámico de la realidad, los casos de carga que producen más daño a los componentes principales de la multiplicadora. De esta forma se podrá ensayar la multiplicadora con las mismas cargas que se han utilizado para el diseño y garantizar que el diseño y el funcionamiento de la misma son válidos.

En la actualidad las multiplicadoras se ensayan con una misma condición de carga a lo largo del tiempo en un banco que solamente permite cargas estacionarias. Esto quiere decir, que no existen fluctuaciones de velocidad o carga a lo largo de ensayo y que solo se busca incrementar la carga de par hasta un nivel que permita que el ensayo tenga un número de ciclos determinada para que el ensayo tenga una duración más corta.

Este tipo de ensayo es más que cuestionable sabiendo que un aerogenerador trabaja con cargas fluctuantes a lo largo del tiempo, debidas al viento, y que sus escenarios de funcionamiento son muy diferentes. Por lo tanto se crea la necesidad de ensayar el banco bajo cargas dinámicas reales que se producen a lo largo de su vida.

Para ello, se ha estudiado la caja multiplicadora, de un aerogenerador real, y los principales modos de fallo que ocurren con más frecuencia. Seguidamente se han identificado las cargas de diseño de la multiplicadora, bajo la metodología de cálculo de las normativas correspondientes para cada fallo y la experiencia real en campo, y se ha buscado que evento de carga o escenario puede llegar a producir ese fallo y su probabilidad existente de que ocurra en la vida de la multiplicadora.

Finalmente, una vez los casos de carga han sido identificados, se han hallado los parámetros característicos para la generación de las cargas y series de simulación de ensayo en un banco dinámico.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
1. NOMENCLATURA	11
2. PREFACIO	12
2.1. Origen del proyecto	12
2.2. Motivación	13
3. INTRODUCCIÓN	14
3.1. Objetivos del proyecto	15
3.2. Alcance del proyecto	15
3.1. Etapas del proyecto.....	16
3.2. Flujo de la metodología para un ensayo dinámico.....	17
4. INTRODUCCIÓN A LOS AEROGENERADORES	18
4.1. Introducción	18
4.2. El potencial eólico.....	19
4.3. Principales componentes de los aerogeneradores	20
5. LA CAJA MULTIPLICADORA	23
5.1. Configuraciones de multiplicadora	23
5.1.1. Componentes principales.....	25
5.2. Cargas del viento en el diseño de multiplicadoras	27
5.2.1. Procedencia de las cargas de diseño	27
5.2.2. Cargas del viento de las series temporales.....	29
5.3. Flujo de diseño y verificación de las multiplicadoras.....	36
5.3.1. Normativas de cálculo de diseño en los componentes de multiplicadoras.....	38
5.4. Ensayos de vida acelerada en las multiplicadoras.....	39
5.5. Principales modos de fallo de los componentes de la multiplicadora	41
5.5.1. Modos de fallo en engranajes	42
5.5.2. Modos de fallo en rodamientos	45



6. ESTUDIO DE LAS CARGAS DEL VIENTO Y SUS COLABORACIÓN A DISTINTOS TIPOS DE DAÑO	48
6.1. Estudio de la matriz de funcionamiento del aerogenerador.....	48
6.2. Cargas de viento y engranajes	52
6.2.1. Estudio de las cargas contra el micropitting	52
6.2.2. Estudio de las cargas contra Pitting y bending.....	57
6.2.3. Estudio de las cargas contra gripado y rayado	61
6.2.4. Nivel vibratorio de la máquina.....	63
6.3. Cargas de viento y rodamientos	65
6.3.1. Estudio de las cargas contra el daño por cargas elevadas	65
6.3.2. Estudio de las cargas contra el daño por deslizamiento	66
6.3.3. Estudio de las cargas contra el daño de deslizamiento por alta aceleración....	67
7. CARGAS DE VIENTO A SIMULAR	69
7.1. Eventos de producción	69
7.1.1. Producción a potencia nominal.....	69
7.1.2. Producción con mínimo par y girando a un alto porcentaje de velocidad nominal	79
7.1.3. Contact pattern	80
7.1.4. Incremento de la carga en los casos de producción	84
7.2. Eventos de daño	88
7.2.1. Idling	88
7.2.2. Par extremo	90
7.2.3. Máxima aceleración	92
7.3. Eventos especiales	92
7.3.1. Arrancadas	92
7.3.2. Paradas	95
7.3.3. Pérdidas de red.....	98
8. SERIES TOTALES PARA EL ENSAYO Y DURACIÓN TOTAL	102
9. DISCUSIONES	106
9.1.1. Problemas de la normativa de cálculo de bending y pitting.....	106
9.1.2. El banco dinámico.....	107
10. IMPACTO AMBIENTAL	108
11. PRESUPUESTO	110
CONCLUSIONES	111
AGRADECIMIENTOS	112



BIBLIOGRAFÍA	113
Bibliografía complementaria	114



Índice de figuras

- Figura 4.1 Aerogenerador en funcionamiento
- Figura 4.2 Perfil aerodinámico de una pala
- Figura 4.3 Disposición aerogenerador con multiplicador
- Figura 4.4 Disposición aerogenerador Direct Drive
- Figura 4.5 Disposición aerogenerador Híbrido
- Figura 5.1 Configuración multiplicadora
- Figura 5.2 Configuración multiplicadora
- Figura 5.3 Transmisión de par
- Figura 5.4 Curva de potencia
- Figura 5.5 Eje de coordenadas en el buje
- Figura 5.6 Curva de funcionamiento del aerogenerador
- Figura 5.7 Flujo de diseño y verificación
- Figura 5.8 Esquema de ensayo del multiplicadoras
- Figura 5.9 Banco de ensayo de multiplicadoras
- Figura 5.10 Fallo de micropitting
- Figura 5.11 Fallo de pitting
- Figura 5.12 Fallo a bending
- Figura 5.13 Fallo a gripado
- Figura 5.14 Desgaste por cargas elevadas
- Figura 5.15 Desgaste por deslizamiento
- Figura 6.1 Gráficas de funcionamiento



Figura 6.2 Gráfica de funcionamiento

Figura 6.3 Gráfica de funcionamiento 3D

Figura 6.4 Gráfica de funcionamiento 3D

Figura 6.5 Micropitting en función de la velocidad

Figura 6.6 Micropitting en función del par

Figura 6.7 Puntos afectación de micropitting

Figura 6.8 Variación del factor de seguridad de micropitting

Figura 6.9 Pendiente de fatiga

Figura 6.10 Pares equivalentes por engrane

Figura 6.11 Cálculo de daño

Figura 6.12 Cálculo de gripado

Figura 6.13 Amplitud vibratoria en m/s^2 a diferentes

Figura 6.14 Variación de vibración entre ensayo

Figura 6.15 Puntos de funcionamiento de deslizamiento

Figura 6.16 Excel de búsqueda de máximas aceleraciones

Figura 7.1 Evento e12-13

Figura 7.2 Evento e12-15

Figura 7.3 Evento e12-17

Figura 7.4 Evento e12-19

Figura 7.5 Evento e12-21

Figura 7.6 Evento e12-23

Figura 7.7 Evento e12-25

Figura 7.8 Evento e23a-15



Figura 7.9 Simulación de eventos de producción

Figura 7.10 Serie temporal e12-03

Figura 7.11 Funcionamiento de e12-03

Figura 7.12 Simulación evento mínimo par

Figura 7.13 Incremento de par en producción

Figura 7.14 Simulación de eventos de Idling

Figura 7.15 Simulación de gripado

Figura 7.16 Evento de arrancada e31-25

Figura 7.17 Funcionamiento de arrancada e31-25

Figura 7.18 Simulación de arrancadas

Figura 7.19 Evento de parada e41-25

Figura 7.20 Funcionamiento de parada e41-25

Figura 7.21 Simulación de paradas

Figura 7.22 Evento fallo de red 113-12-gl-n

Figura 7.23 Simulación de fallo de red



Índice de tablas

Tabla 5.1	Clase de viento
Tabla 5.2	Eventos de carga de viento
Tabla 5.3	Factores de seguridad de cargas de viento
Tabla 5.4	Duración de eventos
Tabla 5.5	Gráficos de eventos principales
Tabla 6.1	Resumen de daño a bending y pitting
Tabla 7.1	Duración de los casos de producción
Tabla 7.2	Duración total de los casos de producción
Tabla 7.3	Características series de producción
Tabla 7.4	Corrección de desviación estándar
Tabla 7.5	Incremento de desviación estándar
Tabla 7.6	Evolución de contact pattern
Tabla 7.7	Parámetros de fatiga, tratamiento superficial
Tabla 7.8	Cálculo horas reducidas en series de producción
Tabla 7.9	Duración de eventos de Idling
Tabla 7.10	Parámetros de simulación de Idling
Tabla 7.11	Parámetros de simulación de arrancadas
Tabla 7.12	Parámetros de simulación de paradas
Tabla 7.13	Parámetros de simulación de pérdidas de red
Tabla 8.1	Resumen de simulaciones y tiempo
Tabla 8.2	Flujo de simulación



Tabla 8.3 Ejemplo de duración

Tabla 11.1 Resumen de costes



1. Nomenclatura

P_v: Potencia extraída del viento (kW)

ρ : Densidad del aire (kg/m³)

V: Velocidad del viento en (m/s)

A_r: Área barrida por las palas (m²)

Θ : Ángulo de sustentación

α : Ángulo de ataque

φ : Ángulo de inclinación

V_{ref}: Velocidad del viento de referencia (m/s)

V_{ave}: Velocidad media anual a la altura del buje

A: Categoría de máxima turbulencia del viento

B: Categoría de mínima turbulencia del viento

I₁₅: Valor de nivel de intensidad de turbulencia

a: Factor de pendiente en velocidad de viento

x12-13: 12 es el caso de carga y el 13 corresponde a la velocidad del viento en m/s

T: Par en el eje lento

N: Número de ciclos a un determinado par

N: velocidad en RPM en el eje lento

P: Pendiente de fatiga de un tratamiento térmico

N_L: Número de ciclos característicos para el fallo a fatiga de un determinado tratamiento térmico

LDD: Load Data Distribution. Agrupación de cargas por intervalos para reducir los datos de series temporales



2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto

La energía eólica se ha convertido, en los últimos años, en una de las fuentes renovables con más impacto en la generación de energía limpia en nuestro país y otros países como Alemania o Dinamarca.

Los aerogeneradores cada vez son de mayor potencia para poder generar cada vez mayor energía, esto provoca, que cada vez que un aerogenerador no funciona correctamente o tiene que haber labores de mantenimiento el parque deje de generar energía eléctrica, por lo tanto la disponibilidad de la máquina decae, produciendo una pérdida económica.

En la actualidad la mayoría de los aerogeneradores disponen de un componente llamado caja multiplicadora, la cual transmite la potencia del buje al generador, multiplicando la velocidad de giro y disminuyendo el par. Estos componentes formados por engranajes, rodamientos y ejes, son diseñados para poder funcionar una vida de 20 años, pero, en la realidad, se ha visto que en muchas multiplicadoras se generan daños catastróficos antes de los 20 años.

Los fabricantes de aerogeneradores especifican ensayos de vida acelerada para testear que estos componentes son capaces de aguantar durante el tiempo para el que ha sido diseñado. Las multiplicadoras, mayoritariamente, se ensayan en unos bancos incapaces de reproducir las condiciones reales de funcionamiento, limitándose a estos a cargas puramente estacionarias, falseando de este modo el funcionamiento real de estos componentes. Este tipo de ensayo da lugar a las siguientes cuestiones:

- Si el par de ensayo es tres veces el par nominal y un diente rompe, ¿se ha hecho un mal diseño, teniendo en cuenta que estos pares no existirán en la realidad?
- Sabiendo que el funcionamiento de la máquina tiene muchos transitorios, ¿cómo se cuantifican las amplitudes y fluctuaciones de par?
- ¿Qué efecto tienen las aceleraciones en los componentes de las multiplicadoras?
- ¿Cómo afectan las pérdidas o fallos de red en el funcionamiento de las multiplicadoras?
- ¿Realmente sólo los pares altos producen daños a la multiplicadora?
- ¿Realmente siempre se tienen que ensayar con la velocidad nominal?

En los últimos meses han salido a la luz, empresas que han planteado este problema y están invirtiendo recursos en generar bancos de ensayos capaces de producir transitorios de carga para poder emular de mejor manera las condiciones de la máquina. Para ello, es



necesario conocer de antemano, como funcionan estos componentes en el aerogenerador, las cargas con las que se han diseñado, los modos de fallo principales, que cargas producen estos modos y finalmente que parámetros de entrada se le ha de dar al banco de ensayo para poder recrear dichas condiciones. De este modo, se podrá comprobar la correlación de las cargas que se han utilizado para diseñar y realmente el comportamiento del componente frente a estas cargas.

2.2. Motivación

La motivación que me ha impulsado a elaborar este proyecto ha sido el interés que tengo en el sector eólico. Anteriormente finalicé la carrera de ingeniería técnica mecánica elaborando un proyecto final sobre el diseño de un aerogenerador. Con los conocimientos que obtuve haciendo el proyecto, así como, con la continuación de mi formación en esta carrera, me ha permitido la inserción laboral, como becario, en una empresa de aerogeneradores durante casi 2 años. A lo largo de este tiempo mis conocimientos sobre el diseño de componentes de aerogeneradores se han incrementado, pudiendo incluso, debatir aspectos teórico-técnicos, como el propósito de este proyecto.

Al conocer de una forma más profunda toda la vida de una multiplicadora, des de su especificación de diseño, hasta la verificación de la misma, me han permitido debatir con compañeros del trabajo los puntos de verificación de un diseño.

Gracias a la recogida de información y cursos dentro de la empresa, se puede profundizar más concretamente en aspectos algo desconocidos debido a la falta de información pública.

Este proyecto representa también un documento de conocimiento dentro de la empresa donde trabajo, ya que, se han creado diferentes instrumentos y hojas de cálculo a partir de necesidades que ha habido en el proyecto, que han generado conocimiento y herramientas para poder calcular diferentes parámetros representativos para el diseño o su verificación.

En cierto modo, me motiva que la creación de mi proyecto tenga más trascendencia que meramente unos créditos para finalizar mis estudios, esto ha generado que mi dedicación y entusiasmo, hacia este proyecto, fuera creciendo a medida que lo iba desarrollando.

Por último, este proyecto impulsa y da la posibilidad de ver acciones que actualmente se llevan a cabo con un punto de vista más crítico, incitando así a una investigación y un posible desarrollo más profundo para garantizar una buena calidad de diseño y de fabricación.



3. Introducción

En la actualidad la energía eólica se ha consolidado como una fuerte fuente de energía eléctrica. En países como España y Alemania en ocasiones es capaz de producir hasta el 35 % de la energía eléctrica que se consume en un país.

Actualmente todas las empresas que fabrican aerogeneradores invierten en la innovación y el desarrollo de nuevas turbinas que sean capaces de captar más energía a partir de vientos con baja velocidad y así tener una disponibilidad mayor. Cuanto mayor disponibilidad, el factor de carga del aerogenerador aumenta y el rendimiento de las instalaciones también.

El estado de la técnica actual se enfoca a dos ramas, la primera la generación onshore, o aquella donde los aerogeneradores están ubicados en la tierra, y por otra parte una tecnología más nueva, la offshore, que emplaza los aerogeneradores en el mar.

Sea cual sea el emplazamiento los aerogeneradores, principalmente, tienen tres tipos de configuraciones, aquellos que tienen una multiplicadora de velocidad, los que usan un generador síncrono o bien una combinación entre ellos, estos últimos llamados híbridos.

Por lo que refiere al funcionamiento de las multiplicadoras, si se compara con otras máquinas multiplicadoras – reductoras, el funcionamiento, no es estacionario sino con fuertes transitorios y estados de carga dinámicos debido a la fluctuación de viento a lo largo del tiempo.

Por ello las multiplicadoras de los aerogeneradores tienen que ser capaces de aguantar fuertes aceleraciones/deceleraciones y fuertes aumentos/disminuciones de par a lo largo de su vida.

Si fijamos como premisa que un aerogenerador ha de ser capaz de tener una vida útil de 20 años, sus componentes también han de tener ese requisito de tiempo, por lo tanto la multiplicadora, tiene que diseñarse con ese concepto, al igual que todos los componentes que integran las multiplicadoras.

Para ello, cuando se desarrolla un nuevo concepto o modelo de multiplicadora, se procede al testeo y ensayo de vida acelerada, a partir de las cargas de viento que supuestamente verá en su vida, para verificar que es sus principales modos de fallo no se han desarrollado.

La lógica de este ensayo de vida acelerada, entiende que las cargas han de ser fluctuantes y el banco ha de ser capaz de dar este tipo de cargas dinámicas.



Pero en la realidad no se ensayan este tipo de cargas fluctuantes, sino los ensayos son puramente estacionarios, se utilizan unas técnicas de crear un par equivalente a un cierto nivel de ciclos e intentar emular un daño a 20 años, esta técnica no recrea, de buena manera, las condiciones de operación de la máquina. Esto hace que, si un ensayo de vida acelerada actual sale mal, se abran frentes de discusión de las medidas inmediatas a tomar, ya que el ensayo no es fiel a la realidad.

3.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es la elaboración de una especificación técnica para un ensayo de vida acelerada para recrear las condiciones de funcionamiento dinámicas que una multiplicadora ha de soportar en su vida real.

En la actualidad los ensayos que se llevan a cabo son con un nivel de par y velocidad constante sin tener en cuenta los transitorios en los que la vida real tiene que soportar.

Para ello, se pretende estudiar las condiciones de funcionamiento de un multiplicador real, de una empresa de fabricación de aerogeneradores, y separar estos casos de funcionamiento. Para ello será necesario previamente estudiar y conocer que modos de fallo principales sufre un multiplicador y sus componentes y analizarlos bajo las normativas que rigen su diseño.

Una vez se hayan estudiado los modos de fallo, se identificará en series temporales de carga, debidas al viento, con las que se ha diseñado el multiplicador, que situaciones producen ese daño según las diferentes normativas de diseño, para finalmente post-procesarlas y agruparlas para crear unos eventos a simular en banco que reproduzcan, lo más fielmente posible, las condiciones de funcionamiento del multiplicador a lo largo de su vida.

3.2. Alcance del proyecto

Este proyecto se centra en el estudio de las multiplicadoras, de una empresa de aerogeneradores, con una configuración de dos etapas planetarias y una paralela de una potencia de 3 MW.

Se ha seleccionado este modelo de multiplicadora, ya que son las unidades más utilizadas actualmente por esta empresa.



Todas las cargas con las que han trabajado, han sido con cargas reales que las multiplicadoras tienen que soportar. Posteriormente, con la retroalimentación de las mismas, se puede iterar para mejorar el diseño.

El alcance del mismo es un estudio de profundidad sobre los componentes de las multiplicadoras, sus modos de fallo, situaciones donde se pueden dar esos modos de fallo, establecer que series temporales producen daño para justificar que se deben ensayar y finalmente, establecer los niveles de carga y tiempo del ensayo dinámico.

La limitación de tiempo del proyecto conlleva que no sea posible una verificación de resultados con la realidad. Es por eso, que no se entrará en detalle sobre la especificación técnica de las características que deben cumplir los bancos para que se puedan llevar a cabo estos ensayos. Por otra parte, sí que se pueden establecer que pruebas o eventos se pueden ensayar con los bancos estacionarios actuales.

Con el alcance de este proyecto, se abren puertas para la especificación de nuevos bancos de ensayo, la crítica de la técnica desarrollada actualmente, así como, abrir frentes de discusión de otros ensayos dinámicos para otros componentes del aerogenerador.

3.1. Etapas del proyecto

Resumiendo el flujo de objetivos a tratar, se especifican los siguientes puntos a desarrollar:

- Estudio de la caja multiplicadora de una empresa real.
- Identificación de los componentes principales.
- Estudio de los modos de fallos principales y los que ocurren con más frecuencia.
- Análisis del flujo de diseño y normativas sujetas a diseño.
- Estudio de la verificación de la multiplicadora en el banco de ensayo actual.
- Analizar las series temporales de viento de diseño de las multiplicadoras.
- Identificar correlación de las series temporales con los modos de fallo principal.
- Post-procesar cargas que producen daño para la creación del ensayo.
- Creación de la especificación de los eventos a simular con su duración y parámetros principales.
- Conclusiones sobre la nueva creación de un ensayo dinámico para la recreación de los casos de funcionamiento reales.



3.2. Flujo de la metodología para un ensayo dinámico

El flujo de la metodología que se va a crear puede llegar a servir para cualquier multiplicadora o reductor, indistintamente del campo de aplicación.

Primero es necesaria la obtención de las cargas que tendrá que soportar la multiplicadora, para efectuar su diseño. Posiblemente, dependiendo del ámbito, existirán normativas que establezcan unos casos de carga tipo, que se tendrán que obtener mediante algún software, para poder homologar el diseño.

Una vez las cargas han sido creadas e identificadas, es necesario conocer de antemano el funcionamiento y modos de fallo principales del componente. Con los modos de fallo que queremos combatir, es necesario buscar en normativa específica, que tipo de cargas o regímenes provocan u incitan al desarrollo del fallo. Seguidamente es necesario la identificación de la existencia de los casos de carga en las cargas que previamente se han simulado o encontrado.

Finalmente con las cargas encontradas se elabora un análisis y post-proceso de ellas, para generar una simulación en un banco dinámico o estacionario que permita simular los eventos de carga seleccionados.



4. Introducción a los aerogeneradores

4.1. Introducción

El aprovechamiento de la energía eólica no es un concepto nuevo, desde la antigüedad la fuerza del viento ha sido aprovechada para la traslación marítima mediante el uso de las velas y posteriormente la creación de los primeros molinos de viento para obtener energía mecánica para poder moler el grano. El desarrollo se vio afectado debido a la revolución industrial con la utilización de la máquina de vapor.

Posteriormente la creación de un molino multipala, en los Estados Unidos, para el bombeo del agua, hace crear una vertiente sobre el nuevo aprovechamiento de esta energía. De ello surgen diferentes conceptos de nuevos aerogeneradores de eje vertical y horizontal para poder transformar la energía potencial del viento en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica.



Figura 4.1 Aerogenerador en funcionamiento

Con el desarrollo de estas nuevas máquinas se incita el desarrollo e investigación de los componentes que forman el aerogenerador. En los últimos años, la energía eólica es una realidad, asentada en nuestra sociedad, que proporciona una menor dependencia de la energía de combustibles fósiles.

De la misma manera, estas máquinas tienen que ser fiables ya que la generación de energía de estas máquinas viene determinada por la disponibilidad de viento. Debido al mantenimiento e instalación de estas máquinas es necesario que los componentes que lo formen sean fiables y ser capaces de funcionar correctamente durante el transcurso de los años teniendo en cuenta que su funcionamiento pasa por diferentes puntos de funcionamiento, muy diferentes entre ellos.



4.2. El potencial eólico

El viento, es la característica principal para generar la energía eólica. El viento es generado, principalmente, por el movimiento de masas de aire debidas a una diferencia de temperaturas entre masas.

Si se habla sobre la cantidad de energía eólica que se puede llegar a captar, por un aerogenerador, hace falta establecer una diferencia de energía cinética del viento a la entrada y salida del mismo y un máximo de energía que se puede llegar a captar conocido como límite de Betz. La combinación, de todos estos parámetros, hace que la potencia que se puede extraer del viento es la siguiente:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A_r \cdot \frac{16}{27} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Los aerogeneradores disponen de una palas, diseñadas aerodinámicamente, que permiten obtener una diferencia de presión entre la parte superior e inferior del perfil produciendo una fuerza conocida como fuerza de sustentación (L) que permite la rotación del conjunto del buje. Como contrapartida, también se generan otro tipo de fuerzas llamadas, fuerzas de arrastre (D), las cuales el conjunto del aerogenerador debe soportar y que no favorecen al giro del rotor.

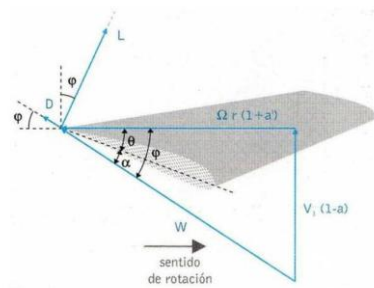


Figura 4.2 Perfil aerodinámico de una pala



Estos perfiles vienen definidos por la longitud de cuerda y su relación con los coeficientes de sustentación y arrastre, al igual que sus ángulos más característicos que son:

Ángulo de sustentación θ : es el ángulo que se forma entre la cuerda del perfil y el plano respecto el cual la pala rota.

Ángulo de ataque α : el ángulo formado entre la cuerda y la dirección de la velocidad relativa

Ángulo de inclinación φ : el ángulo que se forma entre la dirección de la velocidad relativa y el plano respecto el cual la pala gira.

La variación del ángulo de ataque, a través de la rotación de la pala permite graduar la velocidad de giro del rotor y par que se produce en el aerogenerador, por lo tanto la potencia.

A partir de programas de simulación, dónde se pueden tener en cuenta los parámetros más importantes del aerogenerador y el viento estudiado y analizado de una determinada zona, permiten generar series de carga en diferentes ejes establecidos por normativa para poder diseñar y calcular la vida de los componentes de un aerogenerador.

4.3. Principales componentes de los aerogeneradores

En los aerogeneradores existen, actualmente, tres configuraciones que abarcan casi el 100% de los diseños que actualmente se fabrican. Estas tres configuraciones se diferencian en los componentes encargados de transmitir o generar la energía.

La primera configuración, y más común, es la disposición del aerogenerador con una caja multiplicadora con un ratio de transmisión muy elevado que permite multiplicar la velocidad de 15rpm a 1800rpm. Esta disposición, normalmente, también dispone de un generador asíncrono con una velocidad necesaria de entrada de 1800rpm. Si la velocidad no se mantiene constante hay un sistema de rectificadores y variadores de frecuencia que permiten la alimentación de este a diferentes velocidades de giro.



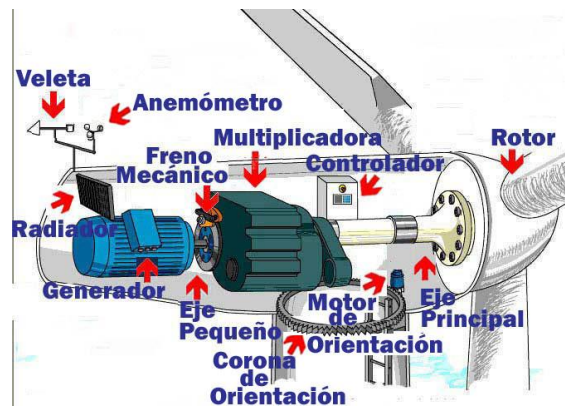


Figura 4.3 Disposición aerogenerador con multiplicador

La segunda disposición, es aquella que en la industria se conoce como, *direct drive*, esta configuración dispone de un generador síncrono, puede ser con bobinas o de imanes permanentes en el cual, la velocidad del buje es directamente la que recibe el generador y este produce la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica.

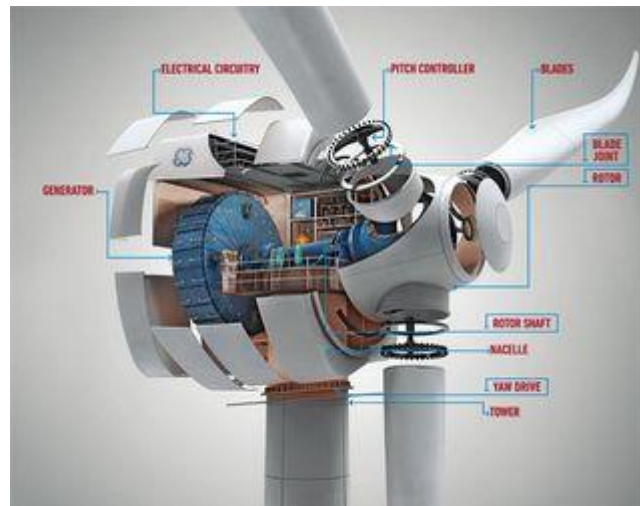


Figura 4.4 Disposición aerogenerador Direct Drive



La última disposición, es menos común, pero sin embargo aquella que los estudios demuestran que puede llegar a ser la mejor opción en un futuro próximo. Básicamente se trata de una combinación de las dos disposiciones anteriores, en el cual existe una multiplicadora con una relación de transmisión no muy alta y un generador síncrono mucho más pequeño. Esta configuración se caracteriza porque prima mucho el peso y el tamaño del aerogenerador.



Figura 4.5 Disposición aerogenerador Híbrido

Después de comentar las principales disposiciones, se observa las partes en común típicas de un aerogenerador como pueden ser las palas, la torre, el buje, el transformador, sistema de control, sistema de orientación de torre y palas, los ejes y rodamientos principales y luego, puede disponer de multiplicadora o no y de un generador síncrono o asíncrono.

Estos componentes tienen que estar diseñados con una vida esperada de 20 años. Tanto el generador como la multiplicadora son los componentes más caros junto a la torre o las palas. Esto precisa que su diseño, complejo, tiene que ser muy fiable.

Este proyecto pretenderá especificar las cargas, que serán necesarias ensayar en las multiplicadoras, debidas al viento para garantizar que el diseño y el funcionamiento de la multiplicadora son y serán correctos.



5. La caja multiplicadora

5.1. Configuraciones de multiplicadora

En la actualidad existen muchos fabricantes de multiplicadoras para el campo de la energía eólica. Cada uno de ellos tiene su conocimiento interno a la hora de diseñar un multiplicador para una determinada turbina.

Básicamente los inputs principales que un fabricante necesita son la velocidad de entrada y salida del multiplicador, así como unas cotas de carcasa. Con estos inputs, un fabricante ya es capaz de establecer qué tipo de configuración usar.

Profundizando en el diseño, el fabricante debe saber el tipo de configuración de sujeción del eje lento que se une a la multiplicadora para saber si la multiplicadora recibirá cargas en otras componentes que no sea la del propio giro.

Una vez se ha establecido la configuración de multiplicador se entra en la parte del diseño detallado de cada uno de los componentes, para ello, el conjunto del aerogenerador debe ser previamente definido para obtener unas cargas debidas al viento que el multiplicador deberá soportar.

Centrándose en las configuraciones típicas de las multiplicadoras se observan dos grandes vertientes, las cuales son:

- Multiplicadoras de 3 etapas: 1 planetaria y dos paralelas.

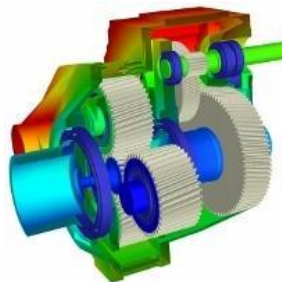


Figura 5.1 Configuración multiplicadora



- Multiplicadoras de 3 etapas: 2 planetarias y 1 paralela.

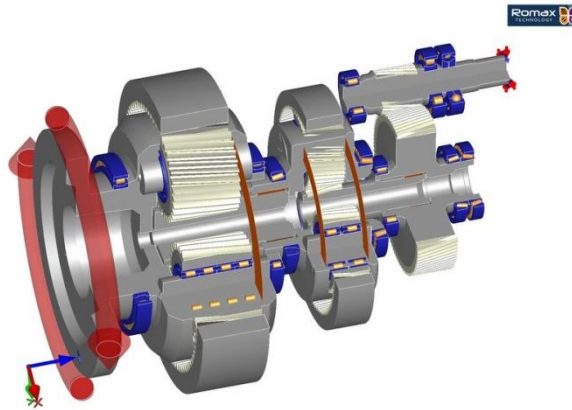


Figura 5.2 Configuración multiplicadora

Como se ha comentado antes la elección de un tipo u otro de configuración depende mucho de la turbina y sobretodo el conocimiento y experiencia del fabricante.

Por lo general, las turbinas eólicas inferiores a los 2MW de potencia eléctrica tienen una configuración de una etapa planetaria y dos paralelas mientras que las superiores a 2MW utilizan 2 planetarias y una paralela.

La principal razón de porque las turbinas eólicas de más de 2MW utilizan dos etapas planetarias es porque al ser turbinas normalmente con una longitud de pala más grande, por limitaciones de velocidad en punta de pala y de ruido aerodinámico han de girar más lentas y esto hace que la relación de transmisión, para obtener una frecuencia de giro de unas 1800 rpm, tenga que ser más grande, la cual se puede conseguir con las etapas epicicloidales, las cuales proporcionan una gran relación de transmisión sin aumentar, considerablemente, el tamaño de la multiplicadora.

Estas etapas planetarias normalmente utilizan un sistema de corona fija, entrada de par por el porta-planetas y el solar como eje de salida. Este sistema proporciona el mayor ratio de transmisión.



5.1.1. Componentes principales

Una multiplicadora está compuesta por varios componentes muy utilizados en muchos ámbitos de la ingeniería, pero el principal reto de este tipo de multiplicadoras es la capacidad de poder trabajar durante 20 años. Para ello, es necesario que los componentes de estas multiplicadoras también tengan esta duración.

Los principales componentes de una multiplicadora son:

- 1) Engranajes
- 2) Rodamientos
- 3) Ejes
- 4) Uniones atornilladas
- 5) Ejes estriados o chavetas
- 6) Porta-planetas
- 7) Brazos de reacción
- 8) Carcasa

A continuación se hará una pequeña descripción sobre las características y funciones principales de los dos componentes que se estudiarán para garantizar su correcto diseño y funcionamiento:

Engranajes:

Los engranajes son los componentes responsables de la transmisión de par y velocidad entre etapas, así como multiplicar la velocidad etapa a etapa.

Las características principales de los engranajes son el tipo de dentado, si es interior o exterior, el tipo de dentado, si es recto o helicoidal, el número de dientes y su módulo y sus ángulos de presión y de hélice.

Obviamente existen muchos otros factores para la definición exacta de una rueda dentada, que más adelante se profundizará en el momento de calcular esfuerzos en los flancos de los dientes

Rodamientos:

Estos componentes permiten la guía y la rotación de los ejes. Los rodamientos también son los encargados de transmitir las fuerzas producidas por los engranajes, a la carcasa dónde están fijados.



Existen una infinidad de tipos de rodamientos aunque lo más utilizados en las multiplicadoras son los rodamientos de bolas, de rodillos o cónicos. Se escogen un tipo u otro dependiendo de las cargas a absorber así como la velocidad a la que deben girar.

Las características principales de los rodamientos a parte de su tipo, son la cantidad de rodillos o bolas que tienen, sus diámetros internos y externos, la jaula utilizada así como la anchura de estos.

En el apartado de cálculo de cargas en rodamientos se profundizará aspectos más detallados.



5.2. Cargas del viento en el diseño de multiplicadoras

5.2.1. Procedencia de las cargas de diseño

Como cualquier mecanismo a diseñar, primero se han de conocer las condiciones de contorno para poder analizar las cargas que se deben soportar para luego dimensionar la máquina.

Las multiplicadoras son componentes vitales dentro del aerogenerador, ya que son las encargadas de transmitir el par hasta el generador multiplicando la velocidad y disminuyendo el par.

Las cargas con las que se diseñan las multiplicadoras provienen del viento. El viento tiene una energía cinética que es absorbida por las palas, las cuales, cuentan con un perfil aerodinámico para optimizar la captación de energía.

La energía del viento captada por las palas, producen unas cargas aerodinámicas que son transmitidas hasta el buje del aerogenerador, hasta el tren de potencia mecánico.

La configuración del tren de potencia de los aerogeneradores a estudiar en este proyecto, dispone de un sistema de par puro, en el cual la multiplicadora solo recibe el par de giro ya que todas las demás fuerzas son transmitidas a partir de una bancada intermedia hacia el bastidor principal y este a la torre. La figura 5.3 muestra la disposición de la transmisión de carga.

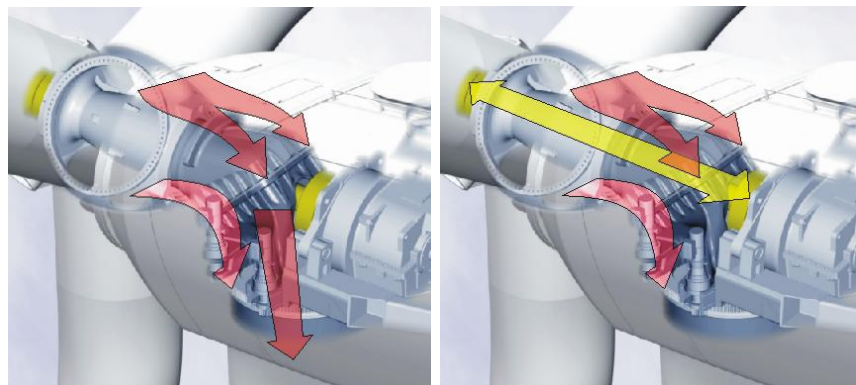


Figura 5.3 Transmisión de par



Por lo tanto la multiplicadora se diseña únicamente con los pares de giro procedentes del buje.

En el siguiente capítulo se explica que cargas del viento se han de simular y los ficheros de salida obtenidos con el programa BLADED teniendo en cuenta los parámetros intrínsecos del aerogenerador y la su curva de funcionamiento de par, velocidad, potencia y control de palas.

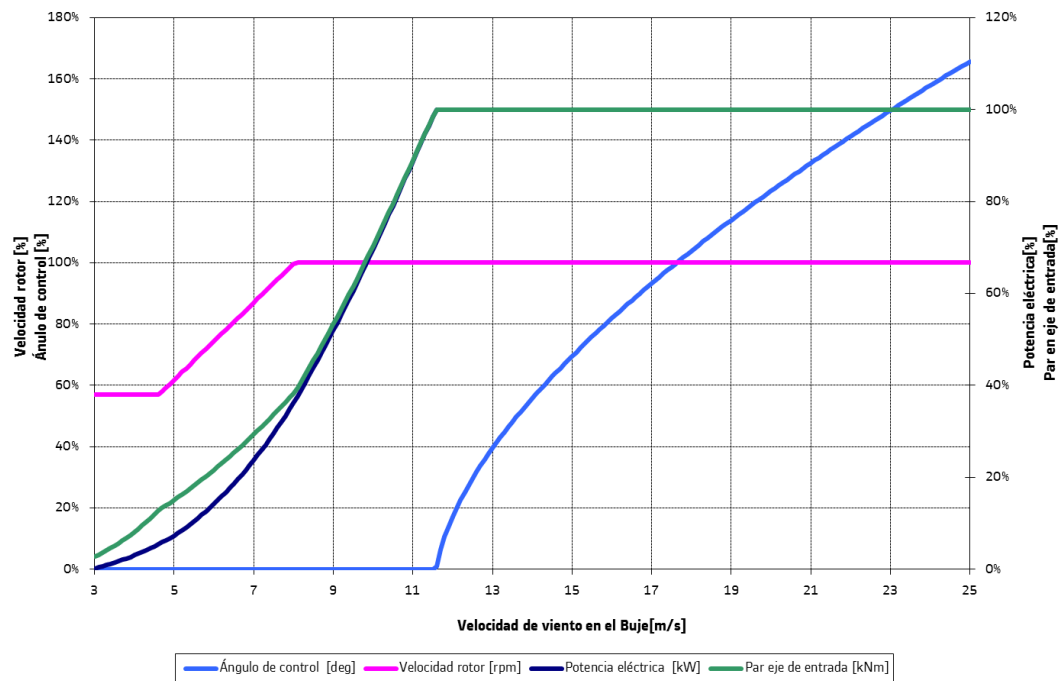


Figura 5.4 Curva de potencia



5.2.2. Cargas del viento de las series temporales

Los datos de viento están obtenidos por torretas de medición de una zona concreta dónde se desea establecer un parque eólico. Se colocan una o diversas torretas a una serie de alturas nominales dónde se miden, parámetros de velocidad, turbulencias o factores de rugosidad del terreno si hay varias torretas.

Las cargas de viento, para el diseño de los componentes del aerogenerador, son procedentes de un conjunto de simulaciones creadas a partir de un programa llamado BLADED.

Para poder obtener dichas cargas en diferentes puntos de la máquina es necesario parametrizar el aerogenerador con datos como, pesos, inercias, cotas y los parámetros de entrada de datos del viento una vez han sido post procesados.

Una vez han sido registrado el conjunto de parámetros, se post-procesan para alimentar al programa BLADED. Este programa necesita de datos de viento medios diez-minutales, máximos y mínimos valores de turbulencia, factores de rugosidad del terreno y la clasificación de probabilidad de diferentes velocidades de viento dónde se obtendrá la función de probabilidad característica de Weibull con sus parámetros de escala y de forma.

Una vez se tienen todos los parámetros, se describe, según la guía de diseño Guideline for the Certification of Wind Turbines, el tipo y clase de emplazamiento. La tabla 5.1 muestra las diferentes clases de emplazamiento según los niveles de velocidades del viento de referencia y/o niveles de turbulencia:

Clase de turbina	I	II	III	IV	S
- V_{ref} [m/s]	50	42.5	37.5	30	Los valores tienen que ser especificados por el fabricante.
- V_{ave} [m/s]	10	8.5	7.5	6	
- A $I_{15}(-)$	0.18	0.18	0.18	0.18	
- a (-)	2	2	2	2	
- B	0.16	0.16	0.16	0.16	



$I_{15} (-)$					
- $a (-)$	3	3	3	3	

Tabla 5.1 Clase de viento

Dónde:

- V_{ref} = velocidad de viento de referencia
- V_{ave} = velocidad media anual durante años a la altura del buje
- A = Categoría para la máxima intensidad de turbulencia
- B = Categoría para la mínima intensidad de turbulencia
- I_{15} = Valor característico del nivel de intensidad de turbulencia a 15m/s
- a = Factor de pendiente para un nivel de turbulencia.

Finalmente, es necesario traducir estas velocidades del viento, con sus niveles de variación de turbulencia en cargas en diferentes puntos de la máquina.

En el caso de éste proyecto el eje de coordenadas será en el buje según indica la normativa. El esquema de este sistema se muestra a continuación en la figura 5.5:



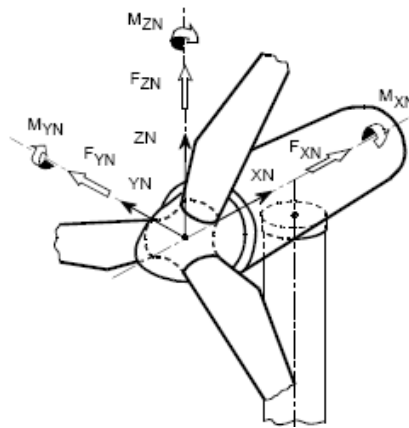


Figura 5.5 Eje de coordenadas en el buje

En función del tipo de cargas que se necesiten se pueden obtener, velocidades lineales/angulares, aceleraciones lineales/angulares, fuerzas y momentos en cada uno de los ejes.

Para poder diseñar y garantizar la homologación de los componentes del aerogenerador, la guía de diseño Guideline for the Certification of Wind Turbines, obliga a crear unos determinados casos de series temporales tanto a cargas de fatiga como extremas y su respectivo factor de seguridad dependiendo del caso de carga creado.

Estos casos de serie temporal se resumen en la tabla 5.2:

Situación de diseño	Caso de carga	Otras condiciones	Tipo de análisis	Tipo de SF
1. Producción de potencia	1.0		U	N
	1.1		U	N
	1.2		F	*
	1.3		U	N
	1.4	Fallo eléctrico externo	U	N
	1.5	Pérdida de red	U	N
	1.6		U	N
	1.7		U	N
	1.8		U	N
	1.9		U	N
	1.10	Formación de hielo	F/U	*/N



	1.11	Efecto de la temperatura	U	N
	1.12	Terremoto	U	**
	1.13	Pérdida de red	F	*
2. Producción de potencia más ocurrencia de algún fallo	2.1	Fallo de control	U	N
	2.2	Fallo en sistema de seguridad	U	A
	2.3	Fallo en sistema de seguridad o control	F	*
3. Encendido	3.1		F	*
	3.2		U	N
	3.3		U	N
4. Parada normal	4.1		F	*
	4.2		U	N
5. Parada de emergencia	5.1		U	N
6. Estacionamiento	6.0	Posibilidad de terremoto	U	N/**
	6.1		U	N
	6.2	Pérdida de red	U	A
	6.3	Ráfaga extrema	U	N
	6.4		F	*
	6.5	Formación de hielo	U	N
	6.6	Efecto de la temperatura	U	N
7. Estacionamiento más ocurrencia de fallos	7.1		U	A
8. Transporte o mantenimiento	8.1	A especificar por el fabricante	U	T
	8.2	Caso de bloqueo	U	A
	8.3	Vibración	F	*
*	SF A FATIGA = 1			
**	SF Terremotos			

Tabla 5.2 Eventos de carga de viento

Dónde:



U: Caso de carga extremo

F: Caso de carga de fatiga

Los factores de seguridad para los casos de fatiga se consideran con SF igual a 1. Por lo tanto las cargas no tienen que estar incrementadas. Para los casos de cargas extremas de este proyecto se multiplicaran las cargas de los inputs, según el caso de carga y tipo de factor de seguridad a utilizar según la normativa.

Origen de la carga	Cargas desfavorables			Cargas favorables
	N Normal y extrema	A Anormal	T Transporte	Todas las situaciones de diseño
Aerodinámica	1,35	1,1	1,5	0,9
Operacional	1,35	1,1	1,5	0,9
Gravedad	1,35	1,1	1,25	0,9
Fuerza inercial	1,25	1,1	1,3	0,9
Influencia del calor	1,35	-	-	-

Tabla 5.3 Factores de seguridad de cargas de viento

Los parámetros de salida del programa BLADED, son el conjunto de casos de cargas que se han simulado en el eje seleccionado.

Cada archivo de carga de serie temporal está formado por un número muy elevado de líneas de casos de carga con una frecuencia de 0.05 segundos. Normalmente hay 12000 casos, pero estos varían en función de la duración de cada uno de los casos de carga en función de la distribución de Weibull obtenida.

En este proyecto se utilizarán las cargas de diseño para los multiplicadores, las cuales son una envolvente a diferentes alturas de máquina.



La tabla 5.4 engloba el conjunto de cargas operacionales obtenidas con su duración a partir de Weibull. Este conjunto de cargas serán el punto de partida para crear simulaciones en el banco de ensayo.

<i>Serie temporal</i>	<i>Número de eventos en 20 años</i>	<i>Duración de cada evento</i>	<i>Tipo de clase</i>	<i>% Duración total</i>	
e12-03	88927,00581	600	Operación	7,8998%	
e12-05	161970,6785	600	Operación	14,3886%	
e12-07	201832,6008	600	Operación	17,9297%	
e12-09	199796,0462	600	Operación	17,7488%	
e12-11	164664,5455	600	Operación	14,6279%	
e12-13	111273,3846	600	Operación	9,8849%	
e12-15	60752,15486	600	Operación	5,3969%	
e12-17	27134,53564	600	Operación	2,4105%	
e12-19	10281,80287	600	Operación	0,9134%	
e12-21	3527,820799	600	Operación	0,3134%	
e12-23	1216,961408	600	Operación	0,1081%	
e12-25	291,567886	600	Operación	0,0259%	91,65%
e113-11.5-gl-0	200	60	Evento	0,0018%	
e113-11.5-gl-n	100	60	Evento	0,0009%	
e113-11.5-gl-p	100	60	Evento	0,0009%	
e23a-07	8900	600	Evento	0,7906%	
e23a-15	360	600	Evento	0,0320%	
e23a-23	20	600	Evento	0,0018%	
e23b-25-pf	20	90	Evento	0,0003%	
e23c-25-pym	20	90	Evento	0,0003%	
e23d-16-os	200	60	Evento	0,0018%	
e31-05	20000	250	Evento	0,7403%	
e31-11.5	1200	250	Evento	0,0444%	
e31-25	1200	250	Evento	0,0444%	
e41-03	20000	90	Evento	0,2665%	
e41-11.5	1200	90	Evento	0,0160%	
e41-25	1200	90	Evento	0,0160%	
e64-01	19860	600	Evento	1,7643%	
e64-07	32620	600	Evento	2,8978%	
e64-15	18200	600	Evento	1,6168%	
e64-23	900	600	Evento	0,0800%	
e64-30	400	600	Evento	0,0355%	8,35%

Tabla 5.4 Duración de eventos

Las unidades de duración son segundos, la clase de operación es el aerogenerador trabajando en condiciones normales mientras que los eventos hacen referencia a las paradas, arranques entre otros eventos que se pueden llevar a cabo en la vida del aerogenerador.

Una vez tenemos todos los casos de carga operacionales, se procede a su graficación para tener una idea aproximada del aspecto de cada una de las series de carga. Para ello se crea una herramienta encargada de graficar los pares Mx y velocidad del rotor de cada una de las series temporales y así poder comparar visualmente diferentes series temporales para observar posibles variaciones drásticas de velocidad o par.



La tabla 5.5 muestra el aspecto de las gráficas de los diferentes casos de carga según la guía de diseño, de los casos de producción, parada, fallo de la red y arranques en el tiempo.

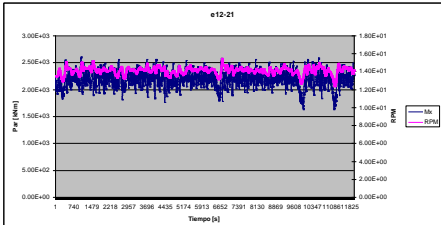
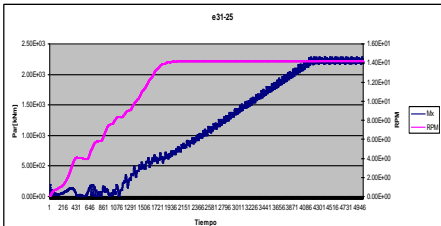
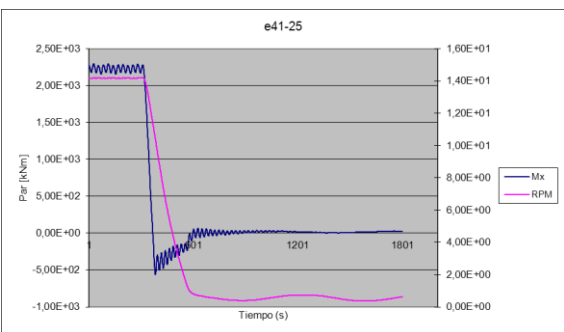
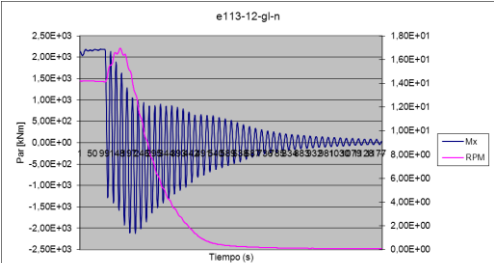
Serie Temporal	Caso	Gráfico
e12-21	Producción	
e31-25	Arranque	
e41-25	Parada	
e113-12	Fallo de red	

Tabla 5.5 Gráficos de eventos principales



Otra forma de observar dichas series, con la cual podemos tener una mejor idea del funcionamiento de la máquina, es crear un gráfica 2D con coordenadas de Par y Velocidad para ver los puntos de trabajo de la máquina.

Si graficamos todos los gráficos de funcionamiento obtenemos el gráfico 5.6 al que se le llamará, gráfico de funcionamiento del aerogenerador

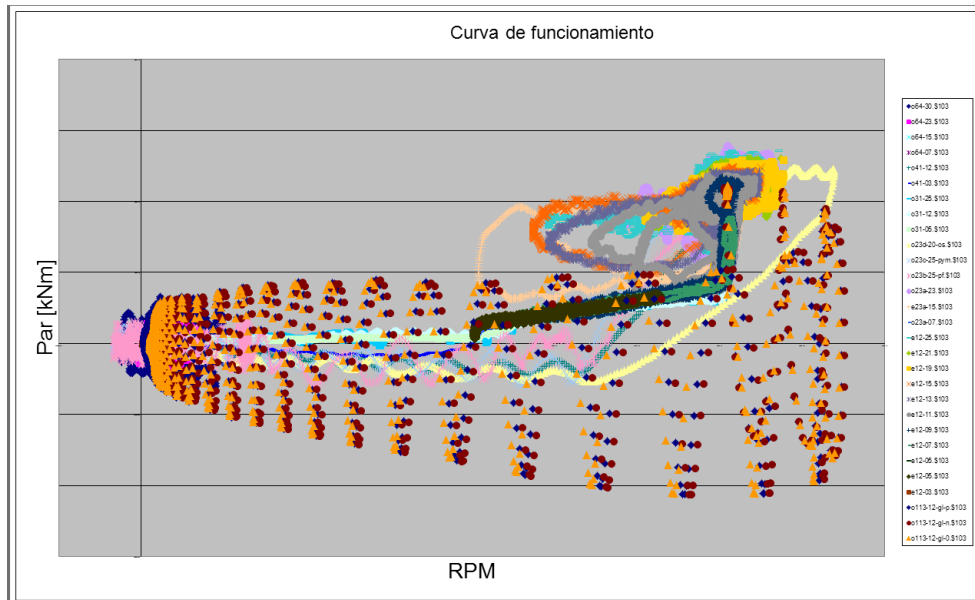


Figura 5.6 Curva de funcionamiento del aerogenerador

5.3. Flujo de diseño y verificación de las multiplicadoras

Cada uno de los componentes se ha de calcular bajo unas cargas post-procesadas establecidas bajo normativa. El flujo para obtener estas cargas y la optimización del diseño sigue el siguiente patrón retroalimentado:



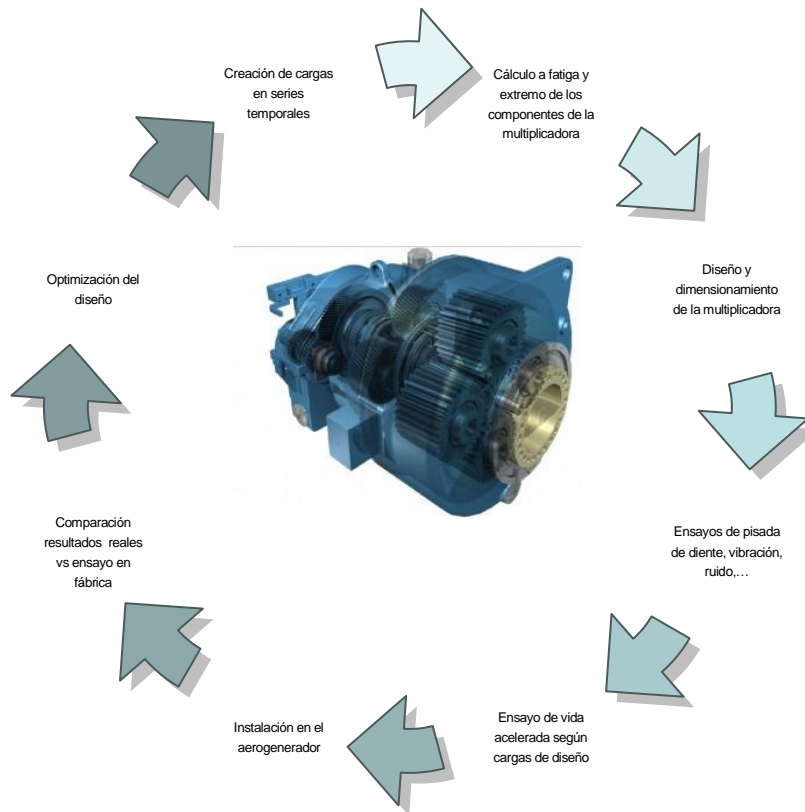


Figura 5.7 Flujo de diseño y verificación

Una vez el multiplicador ha sido diseñado y fabricado, se procede a diferentes ensayos para garantizar que el diseño y la fabricación se han hecho correctamente. Estos ensayos pueden ser para garantizar que la pisada entre ruedas es correcta, los niveles de vibración están por debajo de los especificados, que el sistema de lubricación y refrigeración actúa correctamente en el tiempo o que el conjunto del multiplicador aguanta las cargas de fatiga para las que ha sido diseñado a partir de un ensayo de vida acelerada. Éste último ensayo es el que pretenderá garantizar que el multiplicador es capaz de aguantar las cargas en un determinado tiempo si producirse fallos en sus componentes.



5.3.1. Normativas de cálculo de diseño en los componentes de multiplicadoras.

Las multiplicadoras diseñadas para funcionar en aerogeneradores han de ser diseñadas cumpliendo un seguido de normativas para cada uno de sus componentes.

Una vez se inicia el proceso de diseño de la multiplicadora para aerogeneradores se debe seguir un conjunto de normativas de diseño para poder certificar la máquina y así el aerogenerador en su conjunto.

En estas normativas se explica que cargas se deben utilizar para cada uno de los cálculos de los componentes. Es vital para ello post-procesar las cargas de fatiga o extrema para el cálculo de los componentes.

Al inicio del diseño, principalmente, se sigue la guía de diseño para certificar "*Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines*". Aunque esta sea la guía de diseño más global, para el multiplicador se sigue la "*ISO-IEC 61400 parte 4*" esta profundiza más los aspectos de cálculo de cada uno de los componentes así como las cargas que se han de utilizar y los factores de seguridad que se han de cumplir.

A modo resumen se enumeran las normativas utilizadas para el cálculo de cada uno de los componentes:

Engranajes

Bending: ISO-6336:2006

Pitting: ISO-6336:2006

Micropitting: ISO/TR 15144-1

Scuffing: ISO/TR 13989-1

Rodamientos

Cálculo estático: ISO 76:2006

Cálculo fatiga inicial: ISO 281:2006

Cálculo fatiga avanzado: ISO 16281:2008



Ejes: DIN 7190:2001-02

Uniones atornilladas: VDI 2230:2003-02

Partes estructurales: The Germanischer Lloyd:2003-11 y IEC 61400-1:2005-08

5.4. Ensayos de vida acelerada en las multiplicadoras

Cuando se diseña y se crea una nueva multiplicadora se le somete a un ensayo de vida acelerada para identificar un buen funcionamiento y prevenir problemas futuros. Estos ensayos pretenden encontrar modos de fallo característicos en engranajes y rodamientos, ya que estos componentes son los que fallan con más frecuencia.

Cabe destacar el tamaño de estas cajas multiplicadoras, se hablan de tamaños mayores a los cuatro metros de largo con ruedas dentadas mayores de tres metros de diámetro y potencias de más de 3MW. Estos parámetros dan una idea de cómo tienen que ser los bancos para ensayar estos componentes. Normalmente los bancos de ensayo tienen la siguiente configuración que se muestra en la figura 5.8. En la que un generador se une a una multiplicadora A, ésta multiplicadora se une mediante un acople rígido a otra multiplicadora B y está última a un generador. Esto hace que un generador funciona como motor mientras que el otro como generador, de esta manera también se puede obtener el rendimiento del multiplicador.

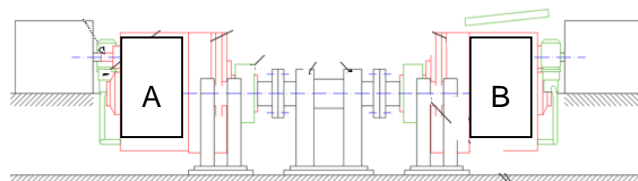


Figura 5.8 Esquema de ensayo del multiplicadoras





Figura 5.9 Banco de ensayo de multiplicadoras

Los bancos de ensayo actuales, principalmente, son bancos de carga estática. Los bancos de carga estática permiten alcanzar, normalmente, potencias más altas que las nominales, pero, no permiten recrear situaciones de funcionamiento reales de la máquina, con situaciones de fluctuación de carga, aceleraciones o pérdidas de red.

El procedimiento que se sigue, para ensayar las multiplicadoras, es aumentar en gran medida el par que recibe la multiplicadora para disminuir el número de ciclos necesarios para fatigar la máquina. A menudo, este factor incrementar es de 3 veces el par nominal de la máquina, manteniendo este par constante durante todo el ensayo, sin previamente estudiar si el contacto entre dientes es correcto ya que son pares que la multiplicadora en la realidad nunca tendrá que transmitir.

Otra vertiente de ensayo se está llevando a cabo desde hace poco tiempo. Éste nuevo ensayo se denomina ensayo dinámico, donde se intenta ensayar la multiplicadora bajo sus condiciones de funcionamiento en la realidad. Este ensayo permite crear transitorios, fluctuaciones de par y velocidad y permitir recrear las situaciones que un fabricante de aerogeneradores necesite.

Para ello es primordial y necesario establecer bajo qué condiciones la multiplicadora funciona, para poder cuantificar que tipo y características de banco son necesarias.

Una vez se ha hecho el estudio para una multiplicadora de un determinado fabricante de aerogeneradores, se crea una especificación de ensayo para poder ensayar de forma acelerada la fatiga del componente.



Los siguientes capítulos muestran el estudio de las cargas y los puntos de funcionamiento de un multiplicador de un aerogenerador, dónde se buscarán que cargas o eventos producen los modos de fallo principales, para seguidamente post-procesarlos y crear una simulación que se pueda ensayar.

En los ensayos de vida acelerada se intenta acelerar la vida a fatiga de los engranajes y los rodamientos. Para ello es necesario identificar las cargas a fatiga una vez post-procesadas para poder especificar las cargas a simular en el ensayo y en algunos casos aumentarlas para acelerar el tiempo de ensayo.

Para los engranajes y los rodamientos es necesario agrupar todas las series temporales de fatiga en una agrupación llamada LDD (Load Data Distribution) en cierta manera el procedimiento a seguir es buscar el máximo y mínimo caso de carga y luego establecer una amplitud de intervalo y dividirlo en varios bins según la metodología de la ISO-6336.

A modo de ejemplo, si se tiene en cuenta la normativa de cargas (Guideline for the Certification of Wind Turbines) y se establecen 32 casos de carga de fatiga, donde cada uno de ellos son series de 10 minutos y se establece una línea de carga dentro de cada caso de 0.05 segundos se obtienen 12000 filas de carga por cada archivo y si en este ejemplo se tienen 32, existen un total de 384000 líneas de carga para tener en cuenta el cálculo

Calcular todo este seguido de cargas es inviable se procede en agrupar casos de carga en intervalos y contar los ciclos que se producen.

5.5. Principales modos de fallo de los componentes de la multiplicadora

En este capítulo se procederá a explicar los principales modos de fallo, en los componentes principales que se inspeccionan en un ensayo de vida acelerada. Estos componentes son los engranajes y los rodamientos.

Seguidamente se explicaran cuáles son los modos de fallo que se pretendan evaluar en el ensayo de vida acelerada, para posteriormente encontrar que series temporales o que condiciones de máquina pueden provocar ese fallo.



5.5.1. Modos de fallo en engranajes

Los principales modos de fallo de los engranajes se desarrollan sobre la superficie de los flancos, estos fallos se pueden clasificar en el siguiente listado:

1. Desgaste – Usura
 - a. Adhesión
 - b. Normal
 - c. Moderada
 - d. Abrasión
 - e. Desgaste excesivo
 - f. Desgaste por interferencia
 - g. Pulido
 - h. Corrosión química
 - i. Corrosión de contacto
 - j. Sobrecalentamiento
 - k. Cavitación
 - l. Fluido por presión
 - m. Picaduras por chisporroteo
2. Gripado - Engranadura
3. Deformaciones permanentes
 - a. Huellas
 - b. Fluencia
 - c. Laminado
 - d. Martillado



- e. Ondeado
 - f. Surcado
 - g. Rebabas
 - h. Macropicaduras (macropitting o pitting)
 - i. Micropicado (micropitting)
- 4. Fatiga de contacto o superficial
 - 5. Fisuras

Todos estos modos de fallo que se han mencionado pueden llegar a producirse en las multiplicadoras, sin embargo, la experiencia muestra que hay unos que se producen con más asiduidad que otros. Los modos de fallo con más frecuencia de ocurrencia, serán, los que se buscarán emular, para recrear las condiciones que pueden llegar a producirlos.

Profundizando un poco más sobre ellos los modos de fallo que se estudiarán serán:

Micropitting: El micropitting es un fenómeno que se produce en las cargas Hertzianas de contacto rodante o deslizante que funcionan u operan en un régimen elasto-hidrodinámico o en regimenes de lubricación, normalmente es el defecto que origina el futuro pitting o picado. La figura 5.10 muestra una fotografía del fallo.

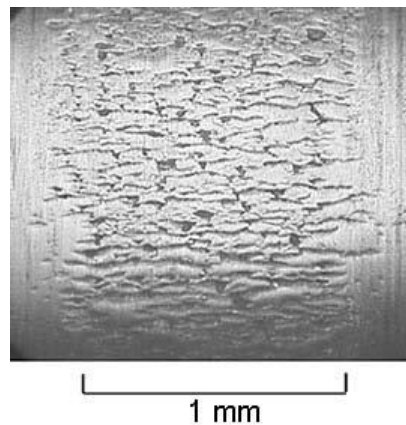


Figura 5.10 Fallo de micropitting



Pitting: El picado es un fenómeno de fatiga que ocurre cuando una fisura de fatiga relativa a cizallamiento se inicia en la superficie del flanco activo o a una pequeña profundidad debajo de la superficie. La fisura usualmente se propaga una corta distancia, paralelamente a la superficie del flanco, para luego girar o bifurcarse hacia la superficie. La figura 5.11 muestra una fotografía del fallo.

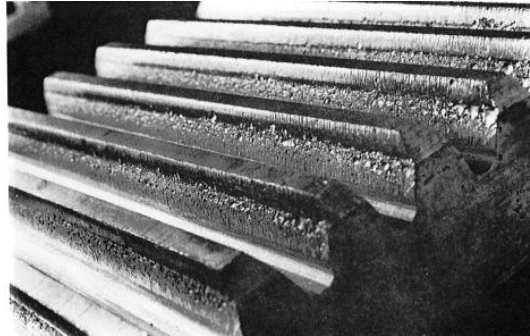


Figura 5.11 Fallo de pitting

Bending: Ocurre cuando la tensión excede el límite elástico del material. Puede tener lugar en la superficie o la subsuperficie de los flancos activos debido a altas tensiones de contacto o en el filete de pie, debido a altas tensiones de flexión. La figura 5.12 muestra una fotografía del fallo.

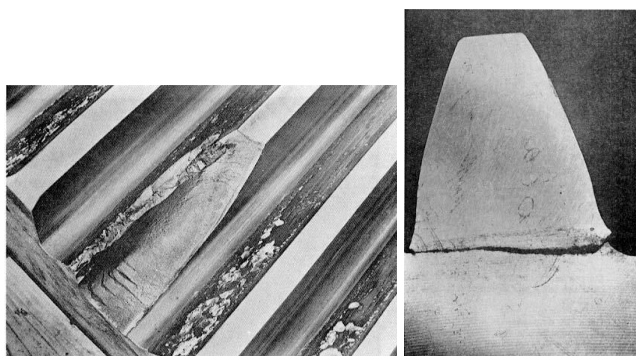


Figura 5.12 Fallo a bending



Scuffing: Adhesión severa que provoca transferencia de material de la superficie de un diente a otro, debido a microsoldadura y arrancamiento. La figura 5.13 muestra una fotografía del fallo.

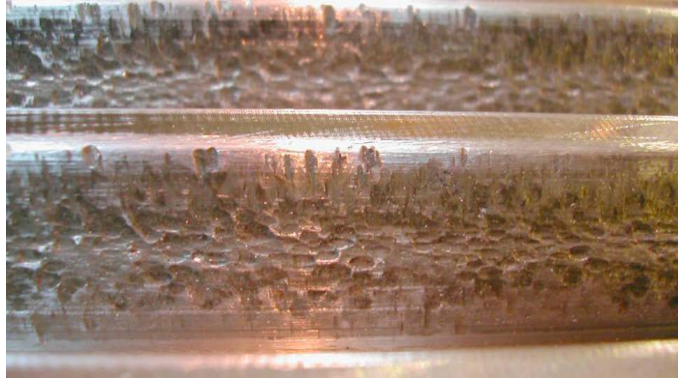


Figura 5.13 Fallo a gripado

En el siguiente capítulo se detallaran donde, como y cuando pueden ocurrir estos modos de fallo y se buscará en que series temporales tienen impacto para después simular.

5.5.2. Modos de fallo en rodamientos

Los principales modos de fallo de los rodamientos se desarrollan sobre las pistas de rodadura, las jaulas y los elementos rodantes. Básicamente se pueden clasificar en:

1. Desgaste
2. Hendidura
3. “Smearing” (transferencia de materia)
4. Tensiones superficiales
5. Corrosión
6. Paso de corriente
7. Gripado
8. Grietas



9. “Flaking” (descarcararse)

10. Rotura de la jaula

Al igual que los engranajes no todos tienen la misma probabilidad de que ocurran, en la experiencia los siguientes modos son los que más se producen y se querrán evaluar en el ensayo:

Desgaste por cargas elevadas: El aumento de carga, puede generar fricción entre las pistas y elementos rodantes que pueden provocar fatiga en los elementos, creando cráteres en dichos elementos. Este aumento también puede generar un exceso de fricción axial pudiendo hacer gripar el componente. La figura 5.14 muestra una fotografía del fallo.



Figura 5.14 Desgaste por cargas elevadas



Slidding / deslizamiento: Un rodamiento que este mal precargado, en exceso o defecto, puede funcionar haciendo deslizar sus elementos rodantes en lugar de hacerlos rodar, esto genera un aumento de fricción provocando un desgaste prematuro del componente.

Un rodamiento que no esté precargado, puede deslizar si las cargas que debe soportar están por debajo de un cierto valor. La figura 5.15 muestra una fotografía del fallo.

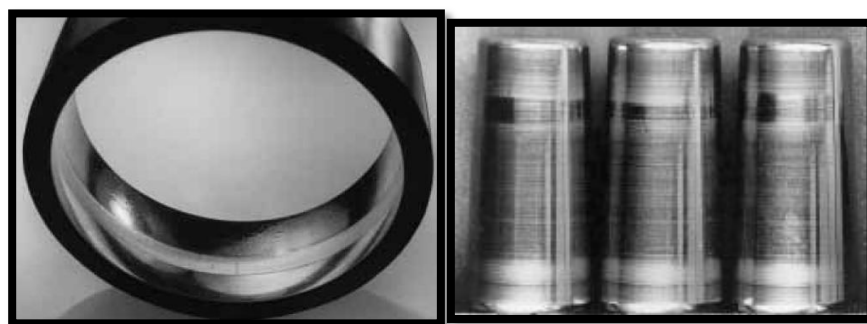


Figura 5.15 Desgaste por deslizamiento



6. Estudio de las cargas del viento y sus colaboración a distintos tipos de daño

6.1. Estudio de la matriz de funcionamiento del aerogenerador

Para analizar más profundamente las cargas del viento en el aerogenerador, se procede a la creación de un gráfico tridimensional de Par, velocidad del eje lento y ciclos, para observar detalles que se pueden pasar por alto si solamente se estudian los niveles de par y ciclos.

Como los datos son puntos dispersos por el espacio, se ha creado una rutina de matlab la cual, a partir de dos gráficos de Par-Ciclos y Par-Velocidad del eje lento, obtiene un gráfico 3D de par-velocidad-ciclos. Para poder crear esta superficie 3D sin tener una ecuación característica, se ha procedido a interpolar linealmente entre los puntos dispersos más cercanos para crear ésta superficie.

Comúnmente siempre se han considerado los pares y ciclos y la velocidad y par por separado obteniendo los gráficos mostrados en la figura 6.1:

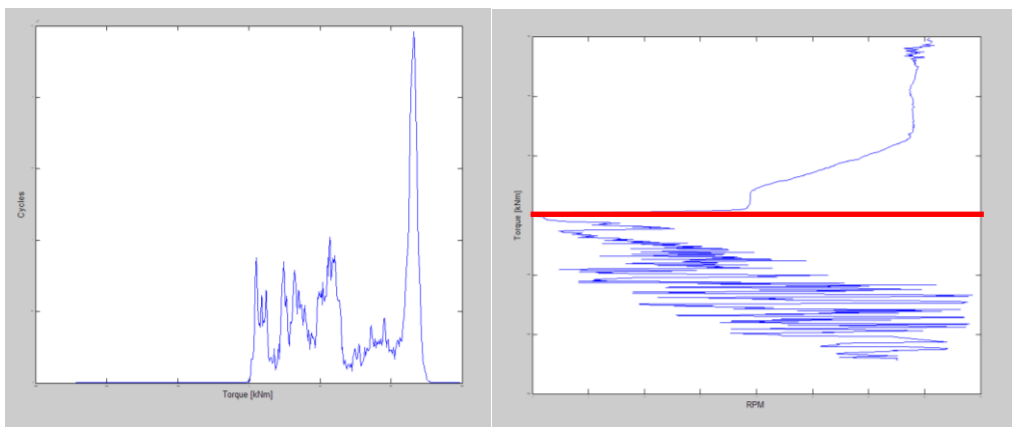


Figura 6.1 Gráficas de funcionamiento



De la primera gráfica se observa que el pico de ciclos se produce en el rango de par nominal como era de esperar, mientras que del segundo se observan dos factores, el primero y más importante es la relación de par y velocidad que existe a pares positivos, los cuales son los que se encuentran en la parte superior de la línea roja. Ésta tendencia es prácticamente igual que si comparamos todas las series temporales de producción como se muestra en el rango del círculo rojo de la figura 6.2:

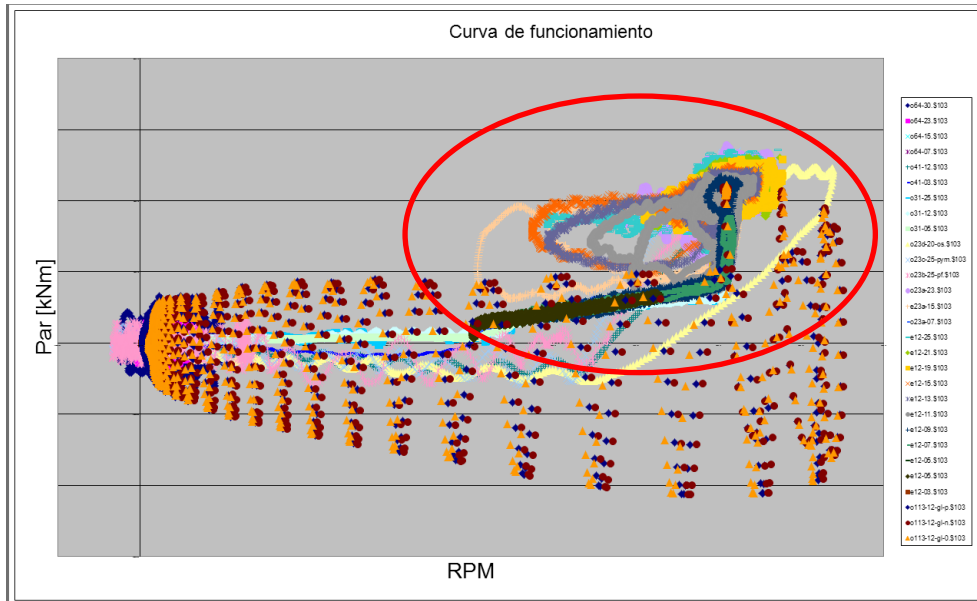


Figura 6.2 Gráfica de funcionamiento

La segunda característica del gráfico de la figura 6.2 es la parte de pares negativos los cuales corresponden a casos de pérdida de red o de mal funcionamiento, la tendencia de éste, es clara, los pares negativos son más negativos cuanto más alta es la velocidad de giro.



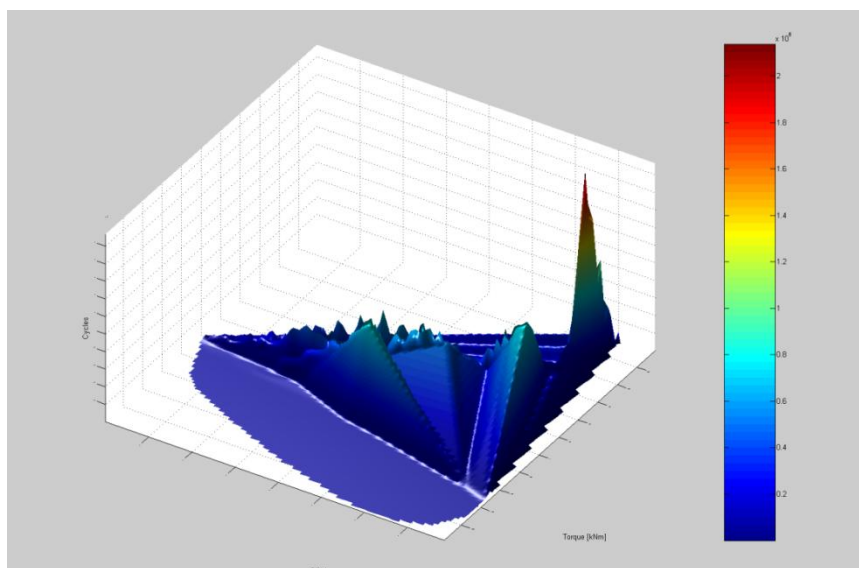


Figura 6.3 Gráfica de funcionamiento 3D

A continuación se muestra la gráfica 3D relacionando ambos gráficos, una vez se ha creado la interpolación lineal entre ellos:

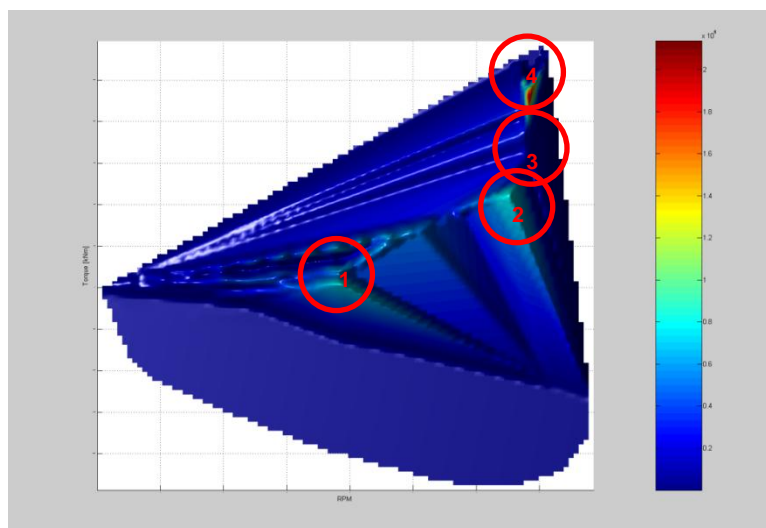


Figura 6.4 Gráfica de funcionamiento 3D



Con el gráfico de la figura 6.4 se obtiene información de mucho valor, que con los otros dos gráficos por separado es más difícil de apreciar.

Existen cuatro puntos de especial interés:

-1; el primer punto se sitúa en la zona de funcionamiento dónde el aerogenerador está girando pero no se ha conectado a red suficiente, serie el punto donde entraría a conexión. En este punto se observa que existen muchos ciclos donde el aerogenerador gira prácticamente sin carga. Este punto es especialmente crítico para los rodamientos del multiplicador que no van precargados, ya que pueden deslizarse en lugar de rodar, provocando así un desgaste más acentuado de pistas de rodadura y de los rodillos.

-2; El segundo punto se sitúa cuando el aerogenerador se mantiene a una velocidad de giro constante y lo único que se busca es aumentar el par a partir de la modificación del ángulo de ataque e incidencia. En este punto también existen muchos ciclos de funcionamiento.

-3; El tercer punto, es el punto intermedio del rango de par a velocidad de giro nominal, como se puede observar el comportamiento del aerogenerador hace que no existan prácticamente ciclos entre medio del par nominal y el par del punto 2. Probablemente el aumento de par hasta el par nominal es bastante rápido y no da tiempo a que muchos ciclos actúen sobre éste intervalo.

-4; El cuarto punto, se sitúa en el punto de funcionamiento nominal de la máquina, el cual como era de esperar, es donde se sitúan un amplio número de ciclos de funcionamiento.



6.2. Cargas de viento y engranajes

6.2.1. Estudio de las cargas contra el micropitting

El micropitting es un fenómeno que se produce en las cargas Hertzianas de contacto rodante o deslizante que funcionan u operan en un régimen elasto-hidrodinámico o en regimenes de lubricación.

El micropitting está fuertemente influenciado por las condiciones de operación, como las cargas, velocidades, deslizamiento entre dientes, temperaturas en la línea de engrane, rugosidad de la superficie, el espesor de la película de lubricante específico o la composición química del lubricante.

Este fenómeno de micropitting comúnmente se observa en las ruedas con una dureza superficial más elevada.

En este proyecto se identificará que cargas influyen más en la aparición del micropitting en el contacto entre dos ruedas dentadas una vez estas ya han sido diseñadas.

Para determinar que cargas de viento originan unas condiciones de par y velocidad que pueden originar este fenómeno se procede a la elaboración de una hoja de cálculo de micropitting según la norma ISO-TR 15411-1. En esta normativa se especifican dos tipos de cálculo el A y el B. El método A es un cálculo muy preciso que necesita el soporte de programas avanzados de cálculo para identificar el espesor de lubricante en todo el flanco del diente a lo largo de la línea de engrane, mientras que el método B solamente se identifican 7 puntos a lo largo de la línea de engrane. Como la finalidad es encontrar la combinación de par y velocidad y hacer un análisis de sensibilidad de la variación del factor de seguridad en función del nivel de carga, se procede a implementar la metodología de cálculo B según la ISO-TR 15144-1.

En los anexos de cálculo se muestran capturas de imagen de la hoja de cálculo utilizada para calcular el factor de seguridad del micropitting y para desarrollar el análisis de sensibilidad.

Los gráficos de las figuras 6.5 y 6.6 presentan la evolución del factor de seguridad de micropitting en función del par y velocidad.

En el primero se establecen cuatro niveles de velocidad constante y se observa la variación de factor de seguridad según el par va aumentando, mientras que en el segundo el par es constante y se hace un barrido de velocidades para ver la dependencia con el factor de seguridad.



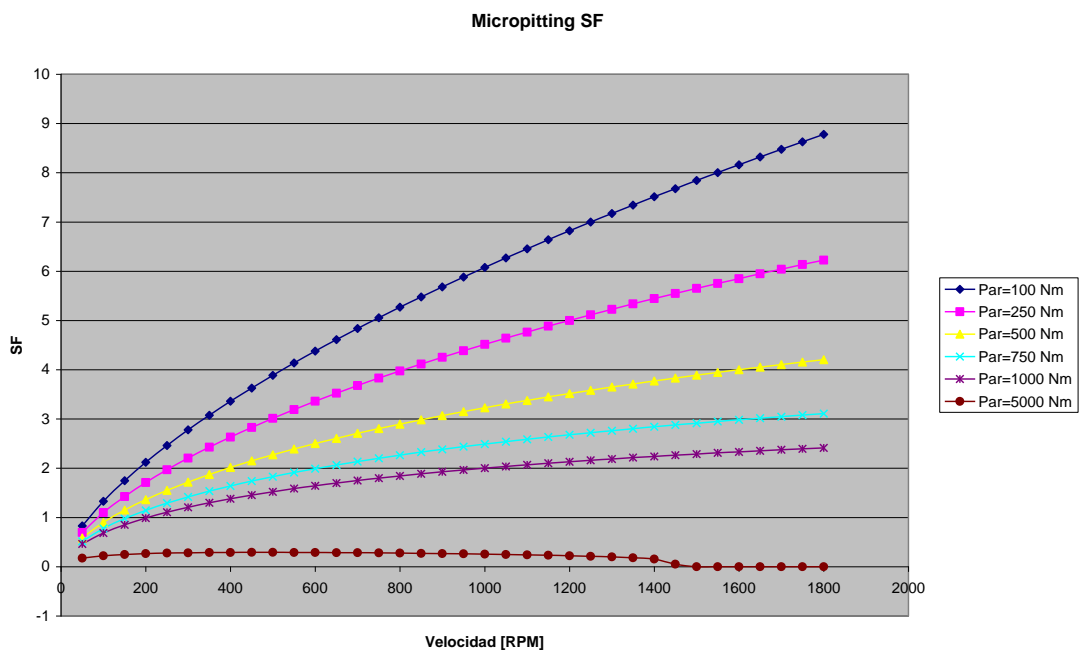


Figura 6.5 Micropitting en función de la velocidad

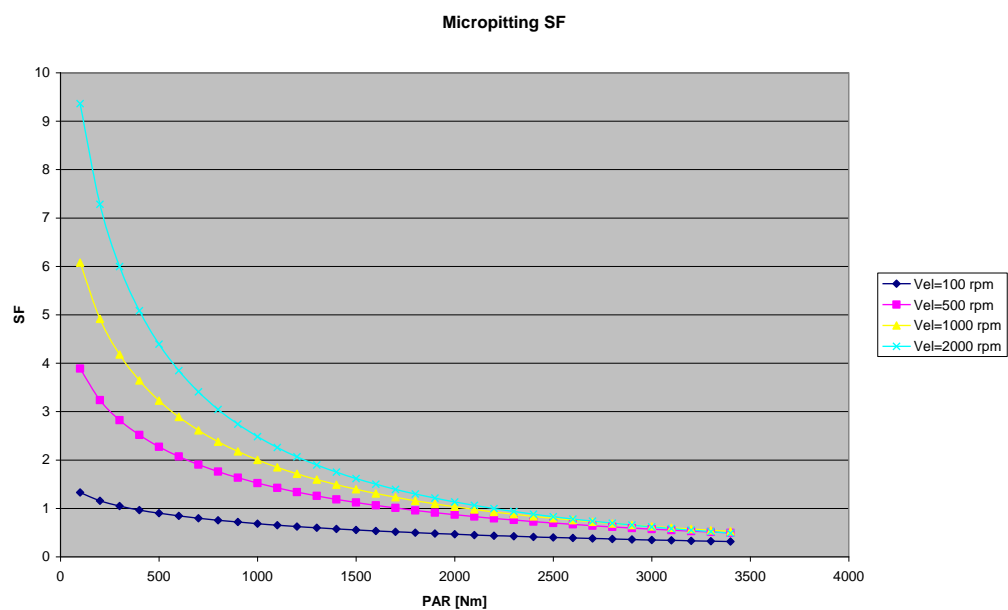


Figura 6.6 Micropitting en función del par



Estudiando los gráficos de la figuras 6.5 y 6.6 se puede concluir que los niveles de par altos y velocidades bajas producen los factores de seguridad más bajos. Por lo tanto aquellas condiciones que pueden originar micropitting.

Aunque según la metodología de cálculo los pares tienen una influencia más negativa en el factor de seguridad ya que, este decrece más rápidamente en cuanto el par aumenta a una velocidad constante.

Las medidas que se han de obtener para identificar las series temporales, que producen más daño a micropitting, es hacer una búsqueda de aquellos casos de carga del viento que cumplan las siguientes características:

- Pares máximos.
- Velocidades mínimas.
- Combinación entre par elevado y velocidad baja.

Para ello se buscaran los casos de carga en la gráfica de funcionamiento del aerogenerador de la figura 6.7 y en los intervalos de par-velocidad media de la LDD.

Los pares máximos y velocidades mínimas se pueden encontrar fácilmente tanto en la gráfica de funcionamiento como en la LDD. A continuación se muestran ambos:

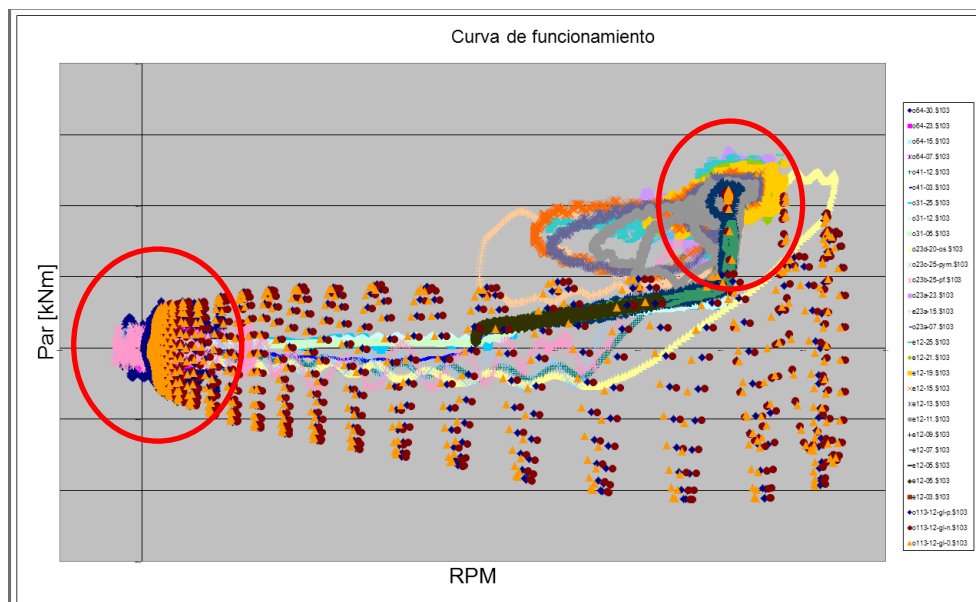


Figura 6.7 Puntos afectación de micropitting



Los círculos rojos enmarcan las zonas de mínima velocidad y máximo par, así como el conjunto de series temporales que producen esos niveles de carga.

En el caso de la LDD aparte de encontrar máximo nivel de par y mínimo de velocidad nos permite establecer qué nivel de carga produce el menor factor de seguridad ya que tenemos todos los intervalos de par y velocidad.

A modo de ejemplo se muestra la variación del factor de seguridad en la figura 6.8 de un parque en concreto:

Se grafican los niveles de factor de seguridad, los cuales han sido alterados porque corresponden a datos reales de un emplazamiento, en función de la velocidad y el par.

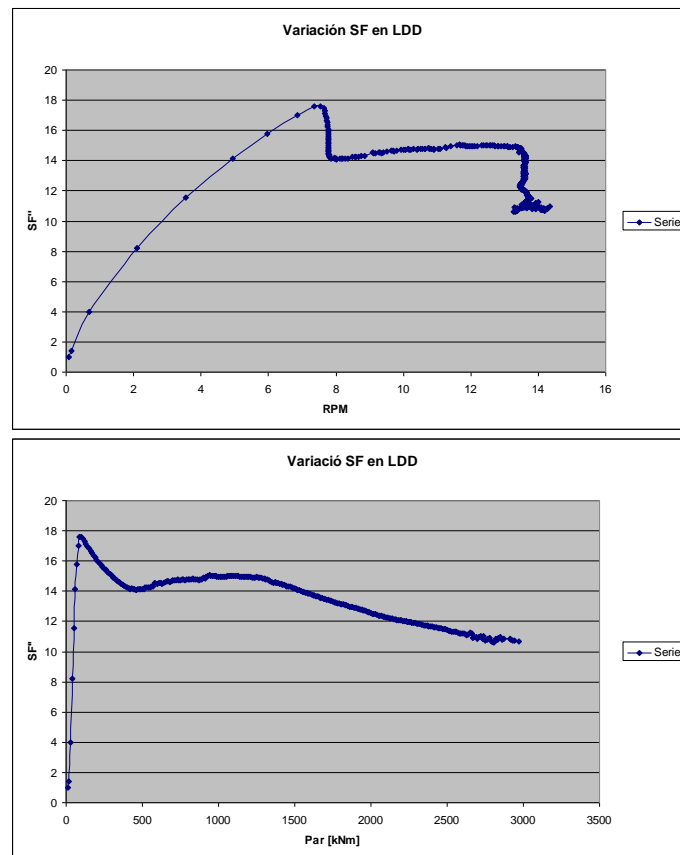


Figura 6.8 Variación del factor de seguridad de micropitting



Como se puede observar en el primer gráfico de la figura 6.8 el factor de seguridad más bajo se encuentra en los niveles más bajos de velocidad los cuales corresponden con los niveles más bajos de par, este caso sería una combinación entre par y velocidad que produce un factor de seguridad más bajo del estudiado en el análisis de sensibilidad.

Aunque estas gráficas de la figura 6.8 muestren el factor de seguridad dependiendo de las variables de par y velocidad afectadas a la vez, se muestra que la tendencia que sigue la gráfica de velocidad hasta 8 rpm es la esperada aunque luego cambia por la actuación del regulador de pala. De igual manera se observa que el gráfico del par también sigue la tendencia del gráfico de tendencias estudiado si no tuviéramos en cuenta en los primeros puntos donde la velocidad es casi nula.

Un punto importante a tener en cuenta es que el factor de seguridad se mantiene más o menos constante en el rango de velocidades nominales entre 8 y 13.5 rpm.

Como conclusión, sobre las cargas a tener en cuenta en el ensayo dinámico, se determina que las cargas a simular deben ser los casos de:

- Los eventos de producción, a niveles de velocidad del viento elevados que producen los pares más altos.
- Los eventos de fallo de red, los cuales producen sobre pares.
- Los eventos de Idling, en los cuales el aerogenerador gira lento y sin par debido a que no ha llegado a la velocidad de conexión de red.



6.2.2. Estudio de las cargas contra Pitting y bending

Los fenómenos de pitting y bending se explican conjuntamente, pues son muchas las características que tienen en común, como por ejemplo la normativa de cálculo de la vida del engranaje de la ISO-6336.

El picado o pitting, como se conoce en el ámbito industrial, se produce cuando las cargas, a fatiga o extremas, superan los límites de durabilidad en la superficie de los dientes de los engranajes, produciendo picados y hoyos en éstas superficies y por lo consiguiente el desprendimiento de partículas hacia los dientes, pudiendo provocar fenómenos como la abrasión.

Dependiendo del tipo de industria los grados de picado son aceptables, incluso pudiendo pasar que el picado aparezca pero no evolucione más a lo largo de la vida del engranaje.

En el caso de las multiplicadoras de aerogeneradores, las cuales han de tener una vida de 20 años si complicaciones, hace que el fenómeno del picado se tenga que evitar.

Si el picado en los dientes aparece, aparte de poder producir fenómenos de desgaste por las partículas que salen, hace que los niveles de vibración de la máquina aumenten y el repartimiento de carga a lo largo del flanco del diente también se vea afectada, produciendo unas concentraciones de carga que disminuyen aún más la vida del engranaje y por lo tanto del conjunto del multiplicador. Es por eso que son necesarias las inspecciones sobre los engranajes una vez superan un cierto nivel de ciclos de funcionamiento, para evaluar si los engranes están en buen estado.

De la misma forma, es posible que un diente rompa a causa de un seguido de cargas a fatiga. Esta consecuencia es mucho más restrictiva, ya que la rotura de un diente puede provocar la destrucción de todo un engrane. Éste fenómeno se conoce como el cálculo de la vida a la resistencia a flexión, conocido como bending.

En general, muchos de los modos de fallo de los engranajes son causados por los fenómenos de pitting y bending. Estos modos de fallo, son causados principalmente por el daño a fatiga que se produce en una serie de años, así como el buen mantenimiento o una lubricación adecuada.

Es por ello, que se identificará las series temporales de fatiga que provocan un mayor daño al picado y flexión del diente, según la metodología de cálculo de la ISO-6336-6.



Según la normativa de cálculo se debe reducir las series temporales en una serie de intervalos de cargas y ciclos llamada LDD. La metodología que se usará será la llamada Ka, donde se dividirá en ciclos de par, ordenándolos de mayor a menor y encontrando un par equivalente, el cual debajo de éste el engrane tendría una vida ilimitada a fatiga.

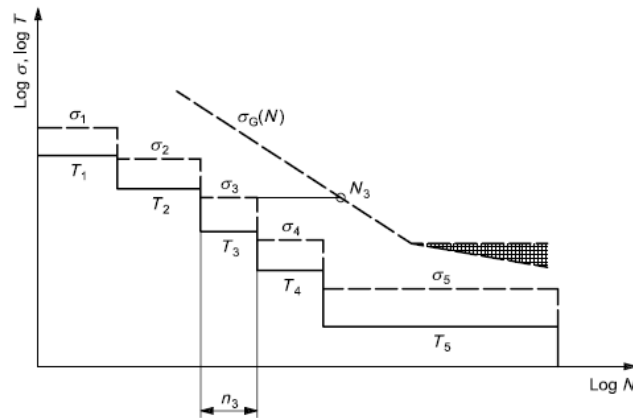


Figura 6.9 Pendiente de fatiga

Por lo tanto se ha creado un programa en Excel, el cual, lee los archivos de las series temporales, las agrupa dentro del intervalo y cálculo el nivel de ciclos y velocidad media obtenida. Seguidamente se necesitan los parámetros de:

- Número de dientes del engrane.
- La pendiente de fatiga, del tratamiento térmico que tienen los engranajes.

De esta manera ya se está listo para implementar la normativa y poder calcular el par equivalente de daño 100% en cada uno de los engranajes teniendo en cuenta su relación de transmisión.

En el anexo de cálculo se especifica la metodología que se ha seguido para el cálculo de ambos modos de fallo.

Seguidamente obtendremos una tabla como la que se muestra en la figura 6.10, donde se muestran los pares equivalente de cada engranaje así como su Ka, el cual se define como el par equivalente entre su par nominal.



Nº Etapa	Tipo	Componente	Z	Material	Planetas	Fix/Input/Outp	GEARS						Bearings	
							K _{a-H} (pitting)	K _{a-F} (root)	Teq-H [kNm]	Teq-F [kNm]	mH	mF	Teq [kNm]	m
1	Planetario	Planeta		case carburized	4 Corona		1,02	1,08	-358,01	-379,09	6,61	8,74		
		Corona		though hardened	Portaplanetas		1,03	1,07	1896,28	1979,31	6,61	6,23		
		Sol		case carburized	Sol		1,06	1,09	460,84	477,62	6,61	8,74		
2	Planetario	Planeta		case carburized	3 Corona		1,05	1,10	-103,38	-108,00	6,61	8,74		
		Corona		though hardened	Portaplanetas		1,05	1,09	388,32	402,53	6,61	6,23		
		Sol		case carburized	Sol		1,08	1,12	73,68	76,20	6,61	8,74		
3	Paralela	Wheel		case carburized			1,07	1,10	72,77	75,29	6,61	8,74		
		Pinion		case carburized			1,08	1,12	-18,68	-19,30	6,61	8,74		
Ball Roller		Bearing											1722,32	3,00
		Bearing											1757,57	3,33

Figura 6.10 Pares equivalentes por engrane

Como lo que se pretende es encontrar que series temporales contribuyen más al daño total del engranaje, se procede a elaborar un sub-programa de Excel en el cual se especificará qué % de daño aporta cada serie temporal sobre el 100% de daño a par equivalente.

Para crear esta hoja es necesario que las cargas de cada serie se post-procesen de forma que se acumulen los ciclos hasta el nivel de par que sobrepasa el 100% de daño, asumiendo que los pares más bajos no hacen daño según explica la normativa.

LDO CORONA				Total Cycles				e113-11.5-g10_Incorgap \$103				e12-21_Incorgap \$103				e12-23_Incorgap \$103															
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000
200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000	1000	200	10	1000					

Esta metodología se explica en los anexos de cálculo del proyecto.

Categoría	Series Temporales	% Daño Bending Ponderado para todos los engranajes	% Daño Pitting Ponderado para todos los engranajes
Producción de potencia	e12-03	0%	0%
	e12-05	0%	0%
	e12-07	0%	0%
	e12-09	0%	0%
	e12-11	0%	0%
	e12-13	30.000%	32.300%
	e12-15	33.000%	35.050%
	e12-17	25.300%	22.740%
	e12-19	8.000%	7.510%
	e12-21	1.829%	1.852%
	e12-23	0.625%	0.422%
	e12-25	0.121%	0.098%
Pérdida de conexión	e113-11.5	0%	0%
	e113-11.5	0%	0%
	e113-11.5	0%	0%
Producción de potencia con fallo eléctrico	e23a-07	0%	0%
	e23a-15	0.036%	0.028%
	e23a-23	0%	0%
	e23b-25	0%	0%
	e23c-25	0%	0%
	e23d-16	0%	0%
Arranques	e31-05	0%	0%
	e31-11.5	0%	0%
	e31-25	0%	0%
	e41-03	0%	0%
Parada normal	e41-11.5	0%	0%
	e41-25	0%	0%
	e64-01	0%	0%
Parado / estacionado / ralentí	e64-07	0%	0%
	e64-15	0%	0%
	e64-23	0%	0%
	e64-30	0%	0%
		0%	0%

Tabla 6.12 Resumen de daño a bending y pitting

A modo resumen se observa que los niveles de carga que producen más daño son los casos de producción a velocidades elevadas, entre 13 y 25 m/s, las cuales contienen sobre pares y bastante ciclos los cuales producen mucho más daño según la metodología de la ISO. Si consideramos los pocos ciclos que se producen a pares negativos, es decir que el generador proporciona el par resistente debido a un fallo de conexión a red, se tendrían que tener en cuenta también los casos de Grid-Loss o pérdida de red.

Como se puede observar en la tabla 6.2, los casos de producción normal entre 13m/s y 25m/s producen más del 96% del daño total sobre el conjunto de los engranajes tanto a bending como a pitting.



6.2.3. Estudio de las cargas contra gripado y rayado

El gripado o rayado, comúnmente conocido como scuffing, éste fenómeno es una forma de abrasión, la cual provoca una transferencia de material de la superficie de un diente a otro debido a una microsoldadura y/o arrancamiento. Para que se dé el gripado o rayado es necesaria una combinación de alta velocidad de deslizamiento y/o o presión de contacto excesivo y/o alta temperatura y/o alta rugosidad de flancos o sobrecargas ocasionales.

Según la ISO/TR 13989-1, para el cálculo para garantizar que no se produce gripado o rayado, se tiene que trabajar con el máximo par operacional, es decir, el máximo par encontrado en la series de fatiga. De esta forma se encuentra el peor caso de gripado en las series operacionales de máquina. Esta normativa también hace referencia a, que si existe un sobrepar al máximo par operacional encontrado y, que éste, tenga una duración de más de 0,6 segundos entonces, ese sobrepar será el par para garantizar el factor de seguridad del gripado.

Aunque el ensayo de vida acelerada sea para simular los daños producidos por fatiga, se ha optado por simular también los sobreparos encontrados para garantizar que no existen riesgos de gripado.

Para ello se ha compilado un programa para hacer la búsqueda de la existencia de éstos sobreparos en las series temporales extremas.

En el anexo de cálculos se explica el procedimiento de ésta subrutina de cálculo.

Para encontrar este sobrepar se han creado unas envolventes de carga a extremas, donde aproximadamente existen 2000 series temporales de 12000 eventos cada una de ellas, y se ha buscado si en dichas series temporales se cumple la lógica de cálculo antes mencionada.

A continuación se muestra una captura de imagen de la rutina en la figura 6.13 :



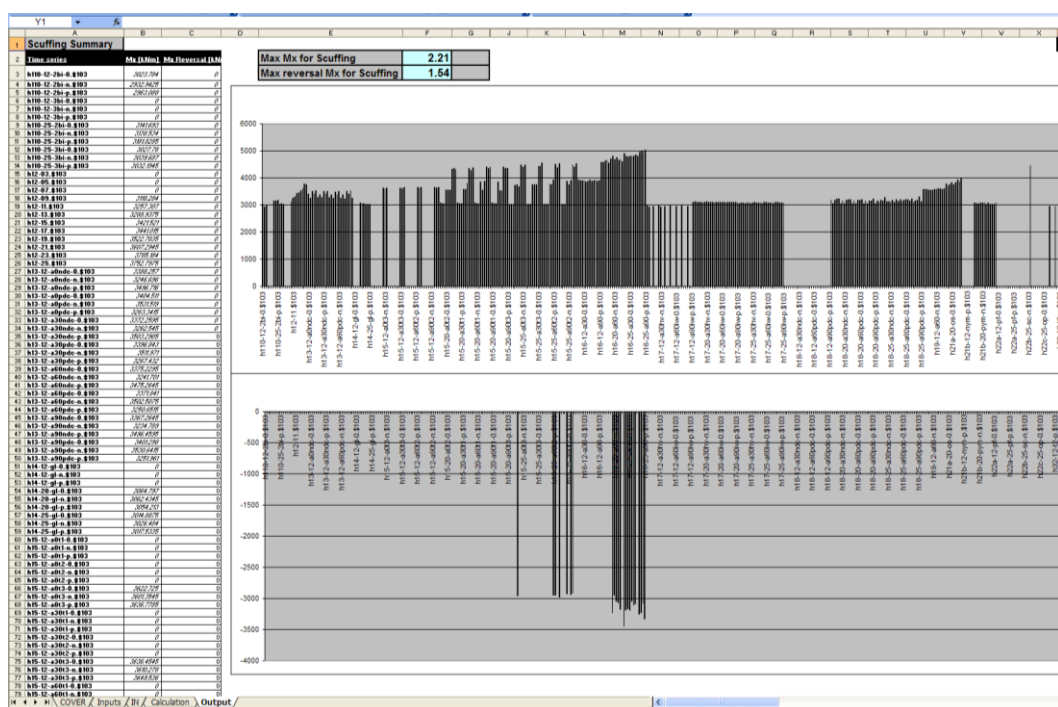


Figura 6.13 Cálculo de gripado

Después de post procesar las cargas del viento, se encuentra que una gran parte de las series temporales cumplen la lógica descrita anteriormente. Una vez estudiado los resultados se observa que el máximo sobre par existente es del orden de 2,2 veces el máximo par operacional, mientras que la media de sobrepares es del orden de 1,5 veces.

Estudiando, todas las envolventes de cargas, se obtiene que, el máximo par extremo, se produce en el caso:

- 1.6 de producción según la GL, en un rango de velocidad de más de 25m/s.

Si analizamos la duración de la serie temporal según la distribución de Weibull y el rango de tiempo dentro de la serie temporal en el que se produce este sobrepas, se obtiene que aproximadamente se produzca durante 1,5 horas en la vida del aerogenerador.

Por otro aspecto que se tendrá que simular en el ensayo de vida acelerada serán 1,5 horas al máximo par extremo a la velocidad nominal de la máquina, ya que es un caso de producción y a esa velocidad de viento la máquina gira a velocidad nominal.



6.2.4. Nivel vibratorio de la máquina.

Un punto muy importante, es garantizar un nivel vibratorio que no esté fuera del rango vibratorio real.

En la práctica será necesario incrementar el par de funcionamiento para que los ciclos necesarios para encontrar un cierto daño se disminuyan y por lo tanto el ensayo no tenga una duración tan prolongada.

Para ello es necesario conocer previamente, el espectro vibratorio de nuestra máquina y garantizar que a esos niveles a simular no se alcanzan amplitudes mayores a las que realmente funciona.

Estudiando los niveles de amplitudes de las máquinas se observa la figura 6.14 la tendencia de vibración en mm/s en función de la velocidad de entrada.

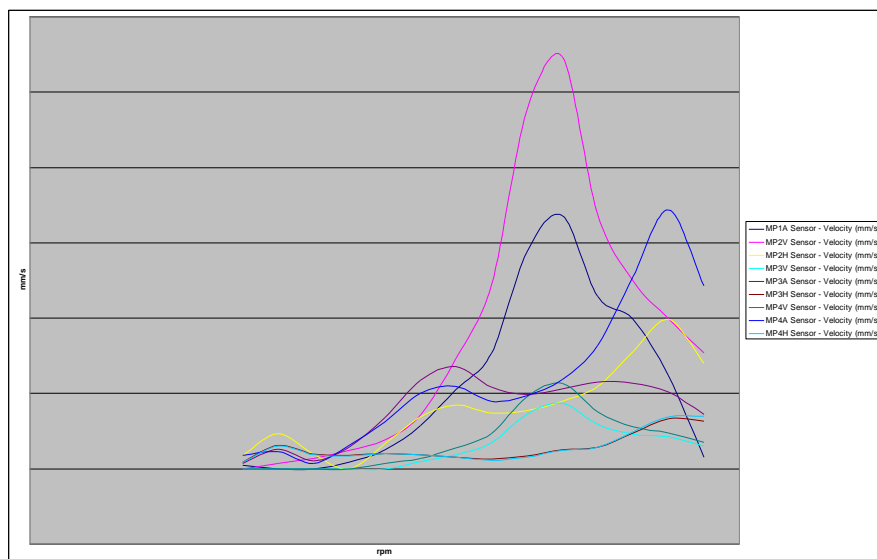


Figura 6.14 Amplitud vibratoria en m/s^2 a diferentes RPM



En el caso de este proyecto se tiene la suerte de tener dos ensayos vibratorios, uno en banco de ensayo y otro en el aerogenerador in-situ.

A continuación se observa que si se comparan las amplitudes de vibraciones medidas al a frecuencia de giro del eje lento a la misma potencia en uno y otro ensayo existen diferencias.

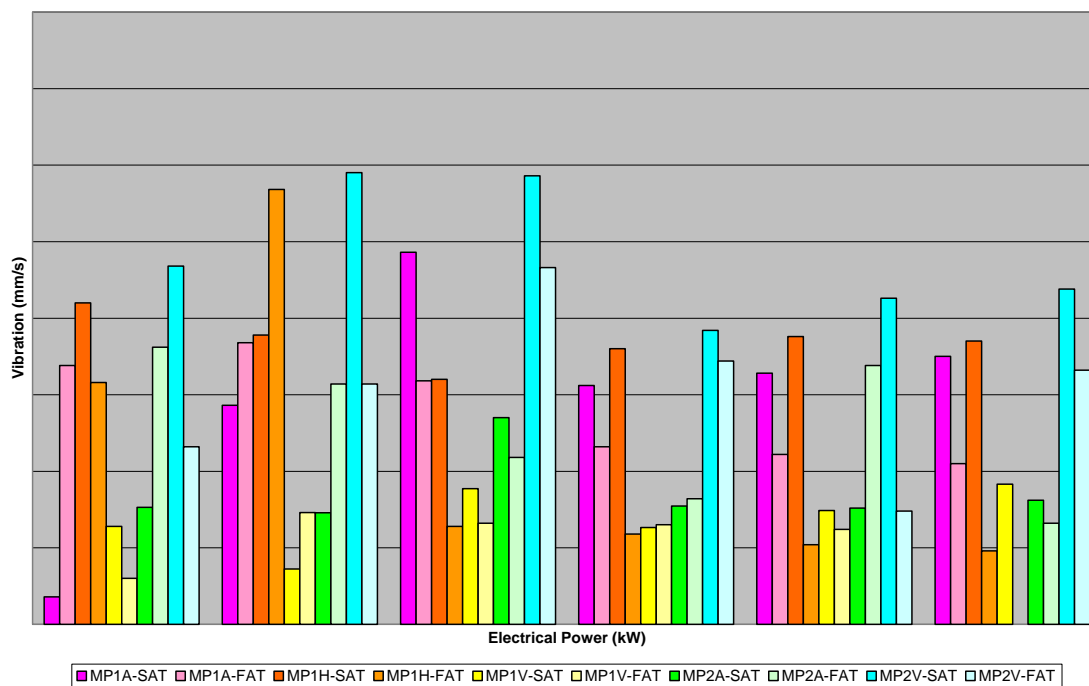


Figura 6.15 Variación de vibración entre ensayo y realidad

Al igual que el anterior gráfico de la figura 6.15 no se especifican escalas numeradas ya que son datos internos y confidenciales.

De éste último gráfico se extrae, que muchos niveles vibratorios son parecidos, añadiendo que la escala es muy pequeña. Pero en algunos sensores existen más diferencias de amplitud. Esto se traduce a que por mucho que se quiera asemejar las condiciones del banco a las de la máquina real, el banco, actualmente, no puede ser 100% representativo de las condiciones de péndulo del aerogenerador y otras vibraciones que el multiplicador ve, como el paso de pala del rotor.

Una vez identificados los niveles vibratorios y las tendencias de vibración en banco a diferentes potencias, es necesario que durante el ensayo se instrumente el multiplicador para garantizar que los pares a simular, los cuales han sido escalados, no sobrepasen los niveles vibratorios reales de la máquina.



6.3. Cargas de viento y rodamientos

6.3.1. Estudio de las cargas contra el daño por cargas elevadas

Como se detalló en la descripción de las multiplicadoras, el concepto de montaje del tren de potencia de los aerogeneradores de esta empresa, hace, que solamente el par de rotación M_x sea la carga que tiene que resistir las multiplicadoras.

Este par que se transmite por los engranajes, crea fuerzas de reacción, entre par de engranajes, en direcciones axiales, radiales y tangenciales que son transmitidas hacia los ejes, de los ejes a los rodamientos y de los rodamientos al conjunto de la carcasa de la multiplicadora y a sus brazos de reacción.

Para analizar el conjunto de cargas, que han de soportar los rodamientos, procedentes de las cargas del viento, se elabora una hoja Excel que parametriza cualquier tipo de multiplicador de 3 etapas de las disposiciones clásicas.

A partir de unos datos de entrada del multiplicador, como son, el número de dientes, ángulo de presión y de hélice, módulos, factores de corrección del dentado, distancias entre rodamientos, tipo de rodamiento, entre muchos otros parámetros, se pueden obtener las fuerzas de reacción sobre cada engranaje así como las fuerzas totales que absorben los rodamientos o los brazos de reacción.

En el anexo de cálculo se mostrará la hoja de cálculo.

Como es de esperar cuanto más grande es el par M_x las fuerzas de reacción más grandes son, de esta manera se estudiará que series temporales operacionales son las que producen más par y por lo consiguiente más cargas que los rodamientos tienen que soportar.

De esta forma, el cálculo de las series temporales que provocan daño en los rodamientos es homólogo a la metodología de los engranajes.

A diferencia de los engranajes, los rodamientos no tienen un valor límite de ciclos, esto conlleva a que aparte de buscar los mayores pares que provocan las cargas más elevadas también se tiene que buscar aquella combinación de par y ciclos que influye más significativamente en la ponderación del par equivalente de cálculo.

Para ello la misma guía de diseño Guideline for the Certification of Wind Turbines establece la fórmula para considerar el par equivalente de diseño para rodamientos, solo a partir de los pares, ya que la relación entre las fuerzas radiales y axiales se mantiene constante durante



todos los casos de carga y el parámetro e , característico de los rodamientos se mantiene siempre bajo la misma condición en estas multiplicadoras.

$$P = X \cdot Fr + Y \cdot Fa \quad (\text{Ec 7.1})$$

$$e = Fa / C_0 \quad (\text{Ec 7.2})$$

Dónde el valor X representa el factor radial e Y el factor axial. Ambos factores dependen del rodamiento elegido.

Los parámetros X e Y varían en función de la relación entre Fa y Fr y la geometría del rodamiento que definirá su capacidad estática y dinámica.

Dónde el valor X representa el factor radial e Y el factor axial. Ambos factores dependen del rodamiento elegido.

La fórmula del par equivalente establecida por la GL es la siguiente:

$$T_{eq} = \sqrt[p]{\frac{\sum T_n^p \cdot n_n}{\sum n_n}} \quad (\text{Ec 7.2})$$

Por lo tanto desde el punto de vista teórico se simularán los casos de carga de viento que provocan los pares M_x mayores, los cuales coinciden con los pares a simular con los engranajes, de los eventos que provocan más daño a pitting y bending.

6.3.2. Estudio de las cargas contra el daño por deslizamiento

Por otra parte como se analizó en la matriz de funcionamiento del aerogenerador también se simularán los eventos en los que el aerogenerador gira con muy poca carga, ya que para los rodamientos de bolas, que tiene la multiplicadora, representa un punto crítico por la aparición del fenómeno del deslizamiento, estos puntos son representados dentro del círculo rojo de la gráfica de la imagen 6.16 :



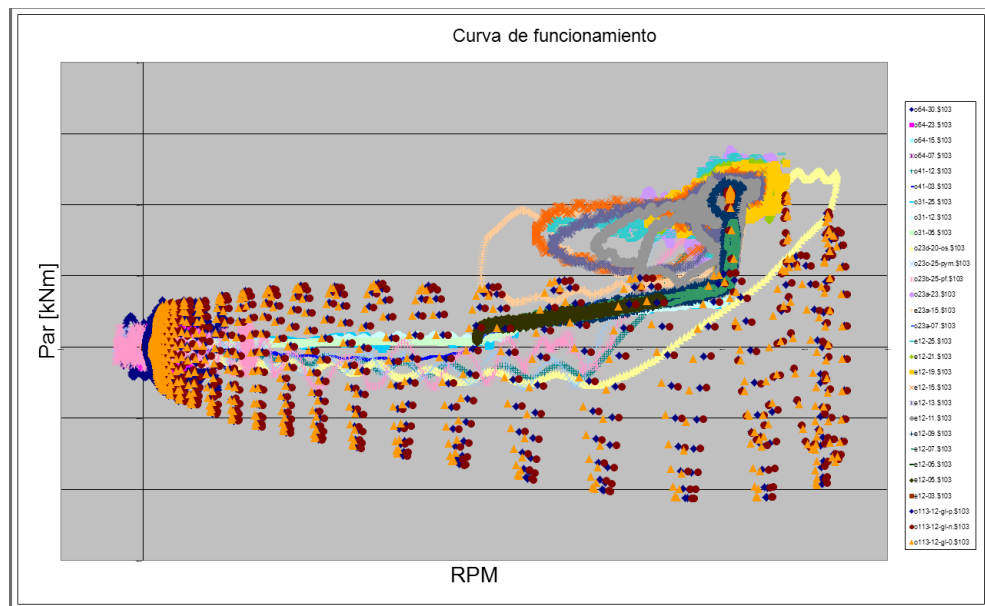


Figura 6.16 Puntos de funcionamiento de deslizamiento

Otro punto importante es simular las máximas aceleraciones que sufre el eje lento, ya que éste también puede provocar situaciones de deslizamiento debido a la variación de velocidad.

6.3.3. Estudio de las cargas contra el daño de deslizamiento por alta aceleración

Ara falta saber también cuál es la máxima aceleración de giro que el aerogenerador alcanzar. Para ello se hará un subprograma en Excel para hacer una búsqueda de la máxima aceleración de todas las series temporales extremas y de operación.

Como se ha explicado en el apartado de cargas en rodamientos, la máxima aceleración puede provocar deslizamiento en rodamientos y fenómenos de impacto dinámicos en los dientes de los engranajes, por ese motivo y para la futura especificación del banco de ensayo será necesario saber las condiciones de aceleración de la máquina.

A continuación se muestran dos imágenes, en la figura 6.17, de los datos de salida de la macro en Excel que se ha creado. La primera muestra el conjunto de series temporales operacionales y el volcado de datos después de una búsqueda dentro del archivo y la segunda una tabla de resultados con los máximos y mínimos valores de todas las series, identificando en qué serie temporal y tiempo de la serie se produce el evento.



Figura 6.17 Excel de búsqueda de máximas aceleraciones

El evento e23c-25 tiene una duración del 0.003% del total del tiempo.

La línea de aceleración dura 0.15 segundos sobre los 90 segundos que dura la serie temporal por lo tanto un 0.17% del tiempo. Si esto se multiplica por el 0.003% de duración total obtenemos un 0.00051%, ahora se multiplica por las horas que hay en 20 años = $20 \times 8760 \times 0.0000051 = 0.9$ horas = 54 minutos de ensayo del evento de máxima aceleración.



7. Cargas de viento a simular

7.1. Eventos de producción

7.1.1. Producción a potencia nominal

Una vez identificadas las series temporales de viento que producen daño, para cada tipo de fallo principal, y su duración prevista del 100% del tiempo, se procede a estudiarlas con el fin de identificar el par medio, la amplitud y rango que cubra el 95% de los casos de par de la serie temporal, así como el estudio para incrementar el par para disminuir el número de ciclos para llegar al daño de fatiga deseado.

Centrándose primeramente en el daño a bending, pitting y daño en rodamientos las series temporales de producción a estudiar son:

Serie Temporal	Daño Bending	Daño Pitting	% Duración tiempo del total
e12-03*	0%	0%	7,88%
e12-13	30.000%	32.300%	9.88%
e12-15	33.000%	35.050%	5.40%
e12-17	25.300%	22.740%	2.41%
e12-19	8.000%	7.510%	0.91%
e12-21	1.829%	1.852%	0.31%
e12-23	0.625%	0.422%	0.11%
e12-25	0.121%	0.098%	0.03%
e23a-15	0.036%	0.028%	0.03%

Tabla 7.1 Duración de los casos de producción

*Éste caso únicamente hace daño a los rodamientos por el posible deslizamiento



Por lo tanto el tiempo total de simulación para los eventos de producción es:

Serie Temporal	% tiempo total producción
e12-03	29.223%
e12-13	36.658%
e12-15	20.014%
e12-17	8.939%
e12-19	3.387%
e12-21	1.162%
e12-23	0.401%
e12-25	0.096%
e23a-15	0.119%

Tabla 7.2 Duración total de los casos de producción

Las series e12-xx corresponden a los casos de producción de series temporales normales mientras que el caso e23a-15 corresponde a un caso de producción con fallo en la red.

A continuación se grafican las siguientes ocho series temporales en función del tiempo y otra gráfica de dispersión de par-velocidad para ver el punto de funcionamiento.



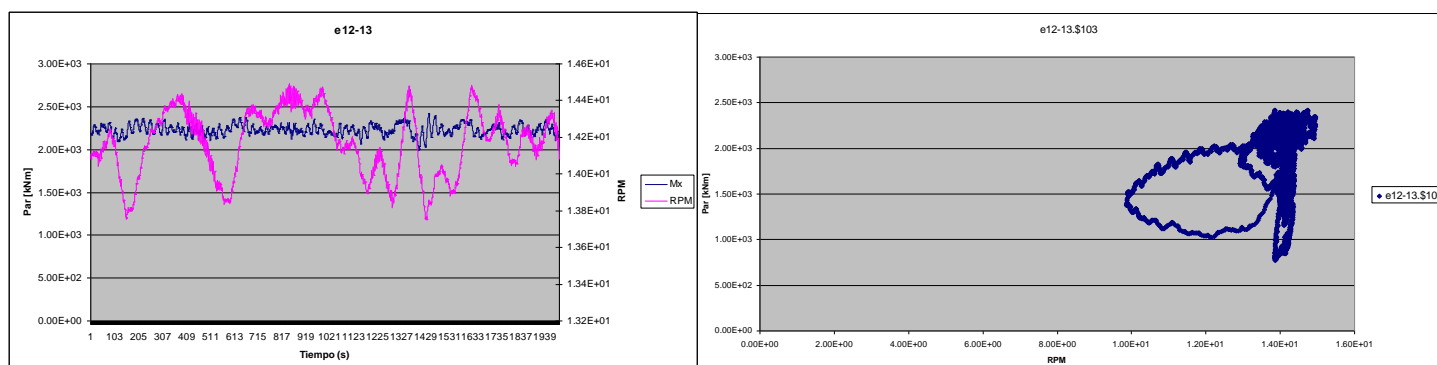


Figura 7.1 Evento e12-13

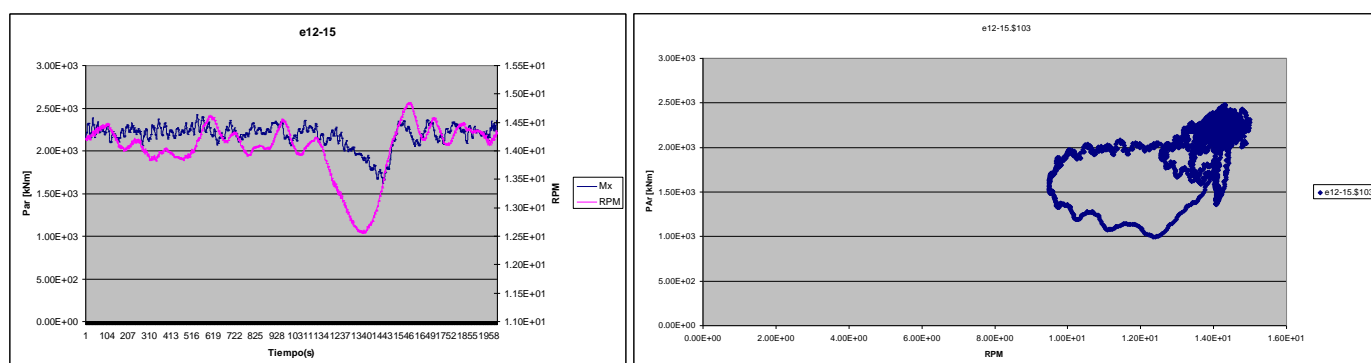


Figura 7.2 Evento e12-15



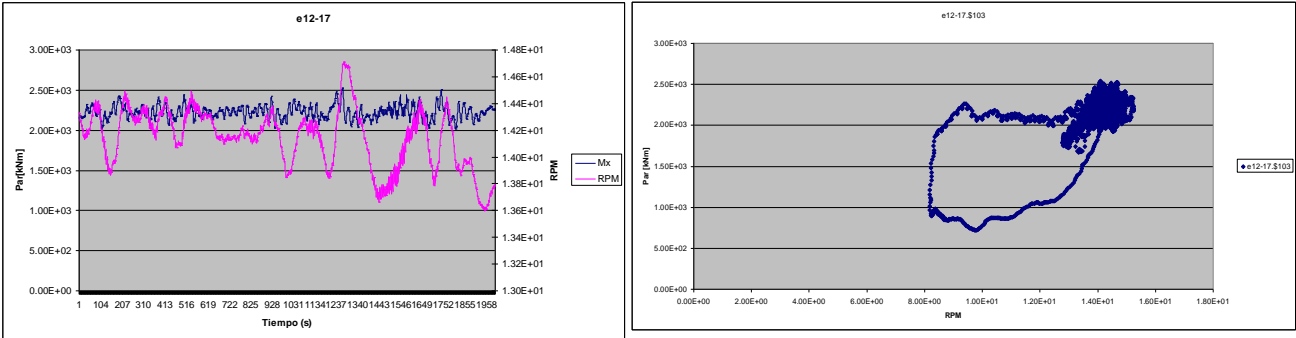


Figura 7.3 Evento e12-17

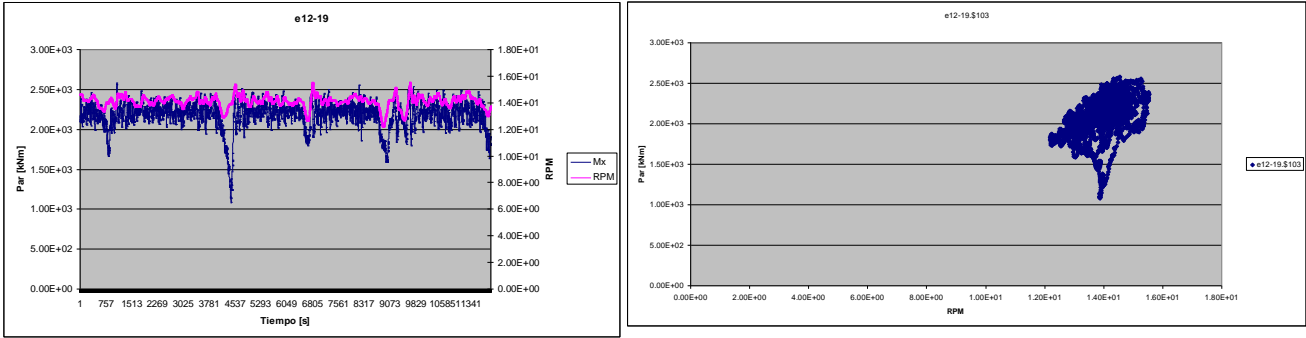


Figura 7.4 Evento e12-19



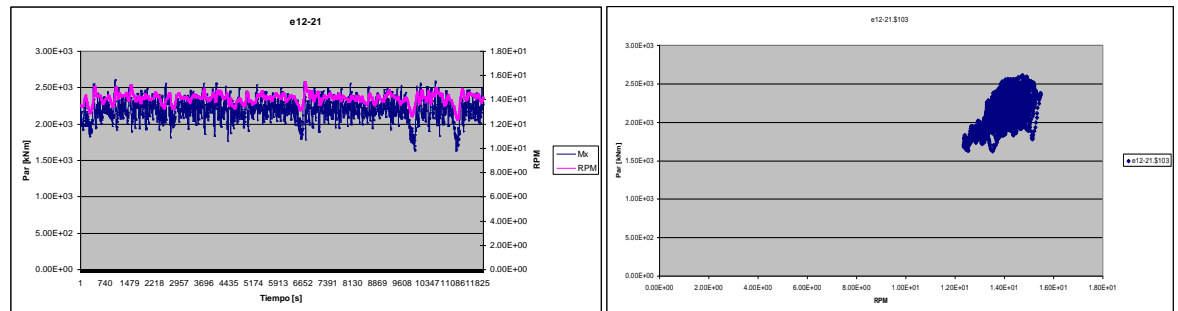


Figura 7.5 Evento e12-21

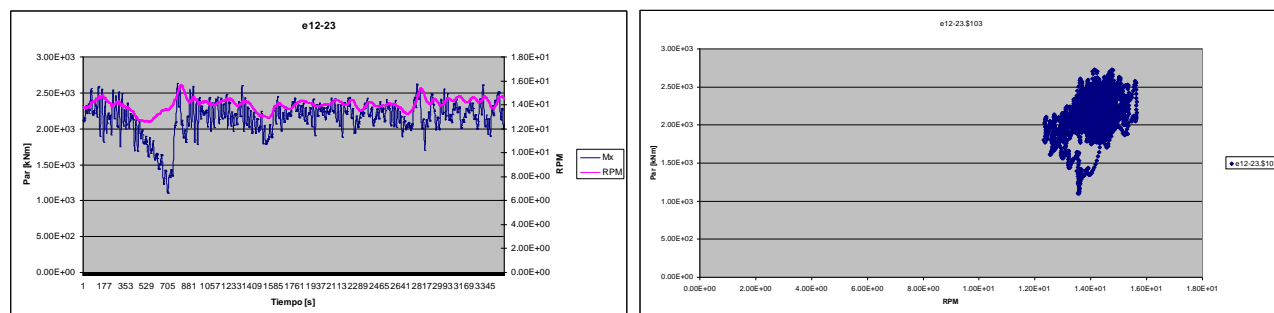


Figura 7.6 Evento e12-23



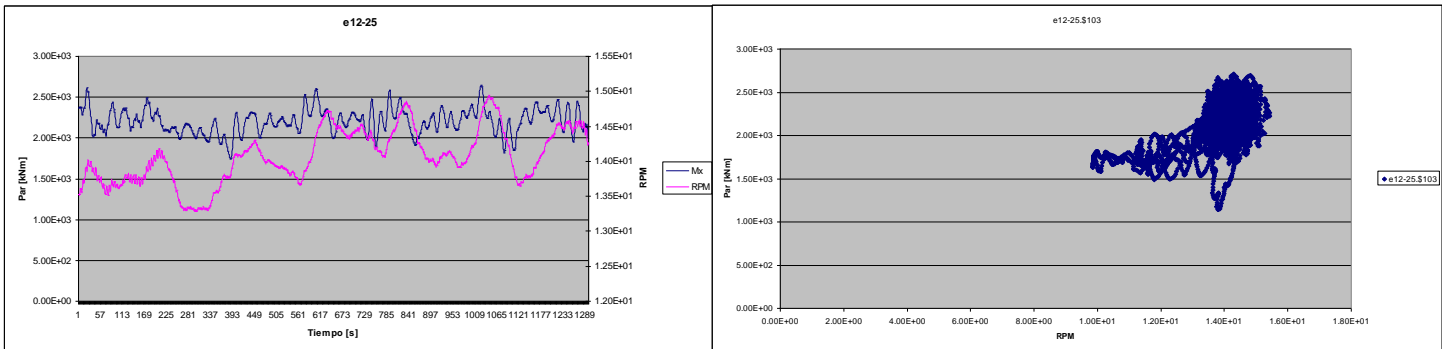


Figura 7.7 Evento e12-25

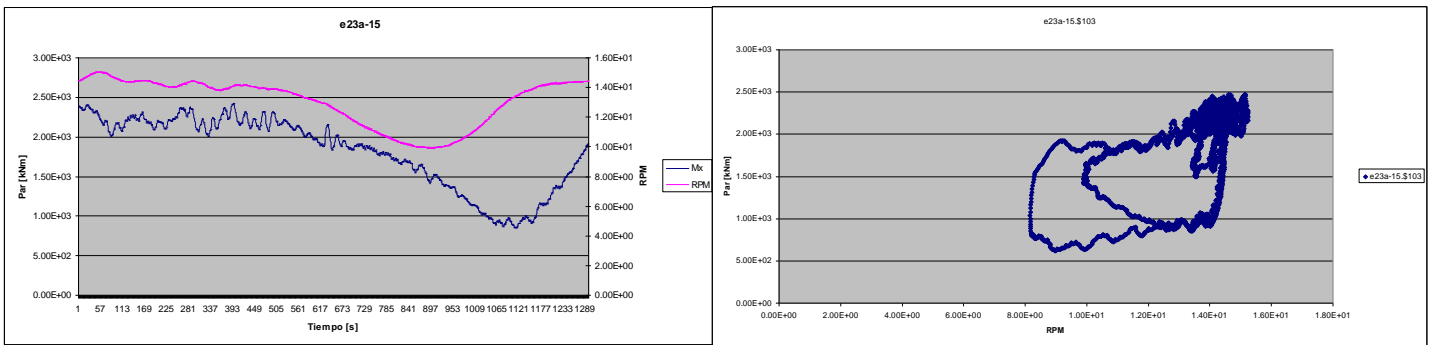


Figura 7.8 Evento e23a-15



Como se puede observar en las gráficas anteriores, los casos que producen daño a pitting y bending corresponden a puntos de funcionamiento a pares elevados y velocidades de rango nominal.

Si se estudian cada una de las series temporales encontramos las siguientes características referidas porcentualmente al par nominal de la máquina:

Serie Temporal	Par medio	Desviación estándar	Máximo Par	Mínimo Par	RPM
e12-13	88.5%	15.9%	106.3%	34.0%	98.0%
e12-15	95.3%	10.2%	108.9%	43.7%	97.8%
e12-17	96.1%	13.1%	111.5%	31.6%	98.0%
e12-19	95.4%	12.5%	113.3%	47.5%	98.5%
e12-21	96.4%	14.2%	114.5%	71.4%	98.6%
e12-23	96.4%	15.8%	119.9%	48.4%	98.6%
e12-25	95.7%	13.3%	119.0%	50.2%	97.9%
e23a-15	92.3%	14.3%	108.6%	27.3%	97.2%

Tabla 7.3 Características series de producción

De la tabla 8.3 se puede extraer que los pares medio de las series temporales son próximos al par nominal de la máquina y que en las series temporales la variación de par es bastante elevada, del orden de un 15% de fluctuación de carga. El máximo par de cada una de las series está entre un 6 y un 20% por encima del par nominal.

A la vista de estos datos se procederá a la elaboración de la serie a simular en el banco dinámico.



Como los pares máximos provocan, según normativa, mucho daño, se recrearán todas las simulaciones hasta esos niveles de par. De esta forma la desviación estándar corregida quedará de la siguiente manera:

Serie Temporal	Par medio	Desviación estándar corregida
e12-13	88.5%	17.7%
e12-15	95.3%	13.6%
e12-17	96.1%	15.4%
e12-19	95.4%	17.9%
e12-21	96.4%	18.1%
e12-23	96.4%	23.5%
e12-25	95.7%	23.3%
e23a-15	92.3%	16.3%

Tabla 7.4 Corrección de desviación estándar



Des. Estándar	Des. Corregida	Incremento
15.90%	17.70%	1.80%
10.20%	13.60%	3.40%
13.10%	15.40%	2.30%
12.50%	17.90%	5.40%
14.20%	18.10%	3.90%
15.80%	23.50%	7.70%
13.30%	23.30%	10.00%
14.30%	16.30%	2.00%

Tabla 7.5 Incremento de desviación estándar

Al incrementarse la amplitud del par, sería necesaria la modificación de la duración de estos ciclos por el aumento del par máximo, aunque después de analizar la desviación y modificación de ciclos se observa que los pares mínimos también decrecen para que el par medio sea el deseado. Es por ello que hay una compensación y la duración de la serie se mantendrá constante.

A continuación se busca el periodo medio entre picos máximos y mínimos para cada una de la series y se procederá al a creación de una senoide la cual, tendrá de media el par medio y sus picos máximos y mínimos serán simétricos con amplitud la desviación estándar corregida.

Aproximadamente las valles en los pares aparecen entre los 3 y 7 segundos, para ello estableceremos un periodo medio para la series temporales de e12-13 a la e12-23 de 4 segundos de oscilación y para las demás de 7 segundos.



Para cada serie se creará una tabla de datos de entrada para el ensaño, la cual tendrá como ecuación:

$$Y = \text{Desv. estandar} \cdot \sin(2 \cdot x \cdot \pi / T) + \text{Par medio} \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Si se elabora cada una de las gráficas con su correspondiente función se puede obtener la serie de producción a simular a lo largo del tiempo.

La siguiente serie de producción, a lo largo del tiempo se repetirá tantas veces como tiempo queremos simular.

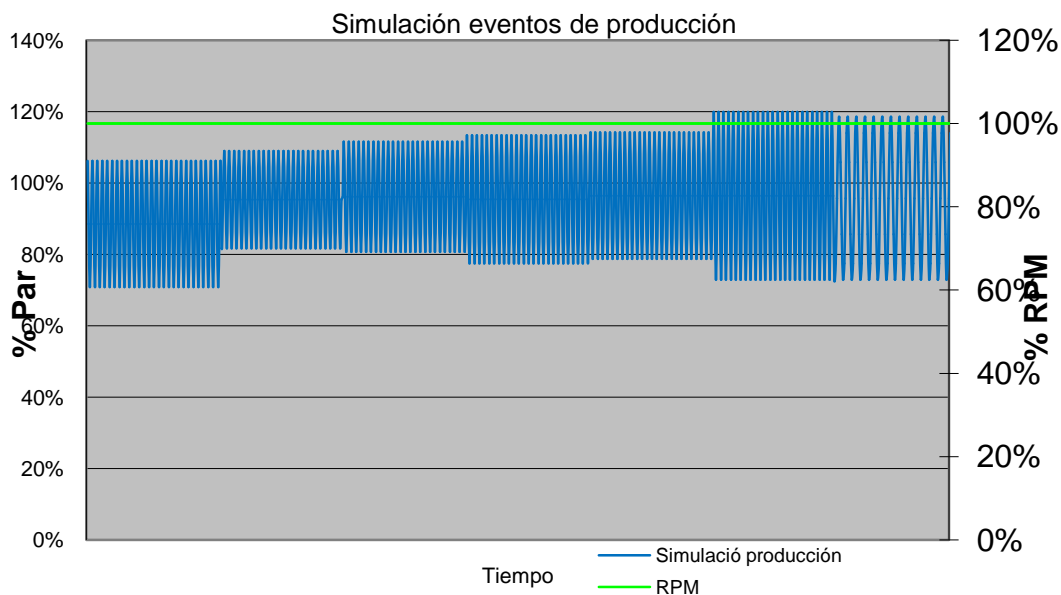


Figura 7.9 Simulación de eventos de producción

Como se ha comentado anteriormente, los casos de producción ocupan un 91% del tiempo total cuando el aerogenerador está girando, por ese motivo, el anterior espectro de carga, de la figura 7.9 se simulará durante el 91% del tiempo que durará el ensayo.



7.1.2. Producción con mínimo par y girando a un alto porcentaje de velocidad nominal

Otra zona con impacto en los rodamientos es aquella en que la máquina trabaja a pares bajos pero tienen una velocidad bastante elevada.

Estos casos se producen cuando el aerogenerador gira en los eventos de producción a baja velocidad del viento. El evento dónde ocurre éste fenómeno es el evento de producción e12-03. Dónde la máquina aún no se ha conectado a red debido a la baja velocidad del viento.

Como previamente se ha introducido en el apartado de los eventos de producción, el evento que produce la valle en la simulación es el siguiente:

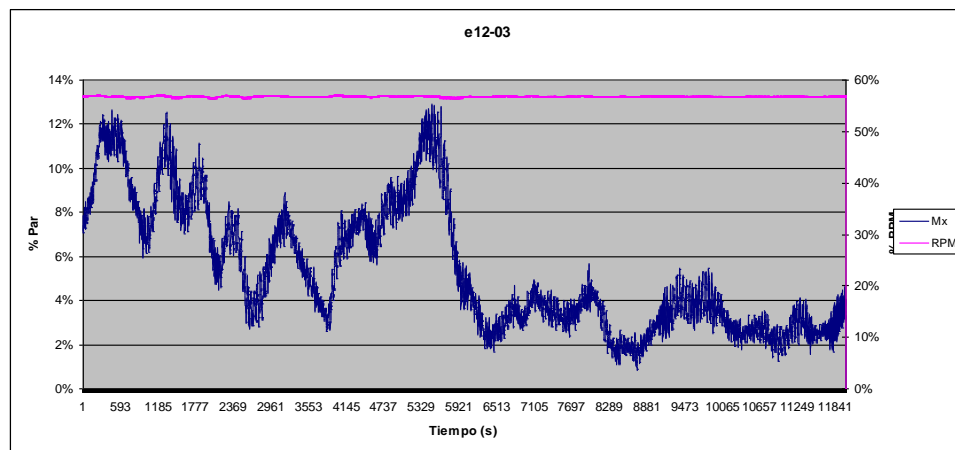


Figura 7.10 Serie temporal e12-03

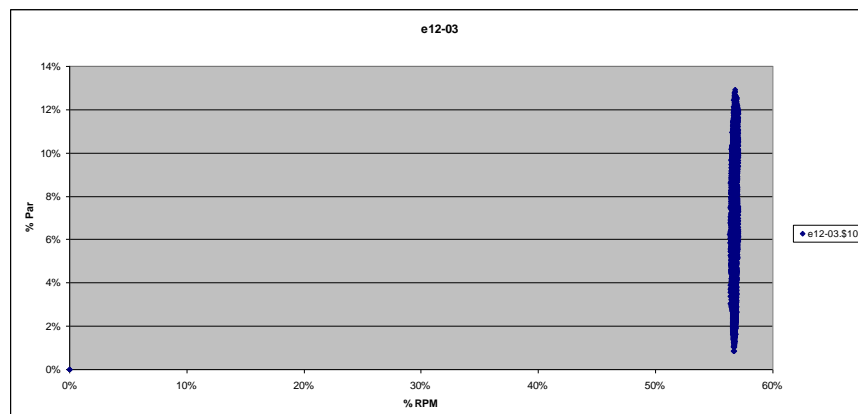


Figura 7.11 Funcionamiento de e12-03



Si se analiza la serie se puede establecer un par medio del 8% y unas rpm medias del 56%. Si creamos el evento para su simulación se obtiene el siguiente gráfico mostrado en la figura 7.12

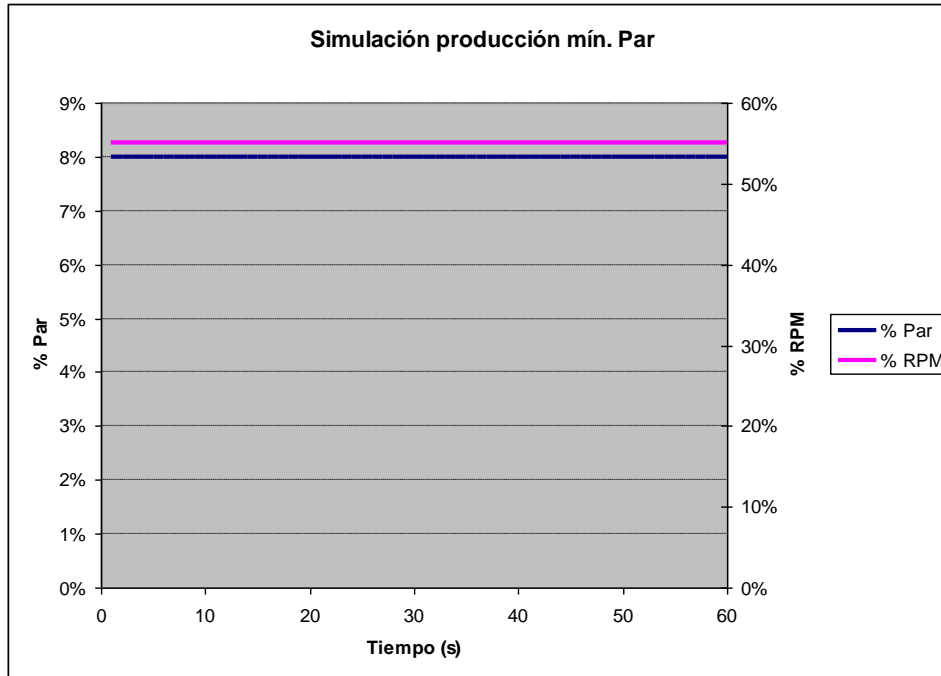


Figura 7.12 Simulación evento mínimo par

7.1.3. Contact pattern

Una vez se ha obtenido la serie a simular, se precisa la amplificación del par para disminuir así el número de ciclos necesarios para alcanzar el daño deseado.

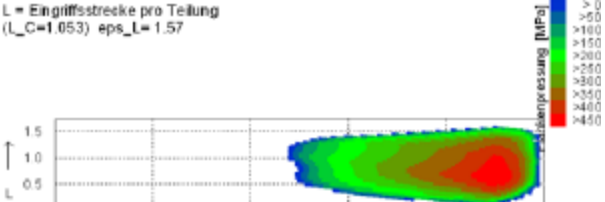
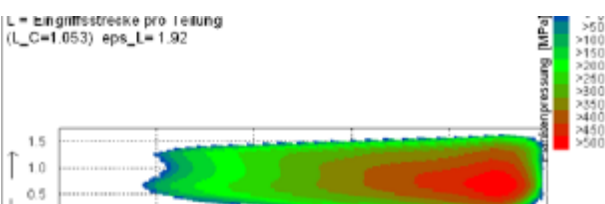
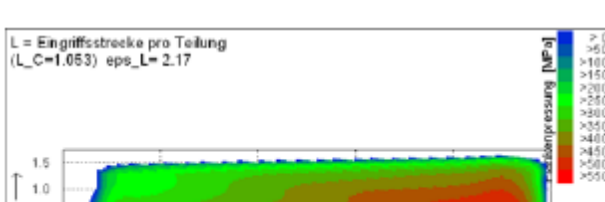


Para ello es necesario tener en cuenta las pendientes a fatiga de los componentes del multiplicador y un factor muy importante que es el contacto o pisada de los dientes de los engranajes según su nivel de carga, llamado contact pattern.

Para tener en cuenta esta característica se analiza la evolución de la pisada según aumenta el nivel de par. Esta característica se puede calcular teóricamente o empíricamente mediante galgas en un ensayo previo.

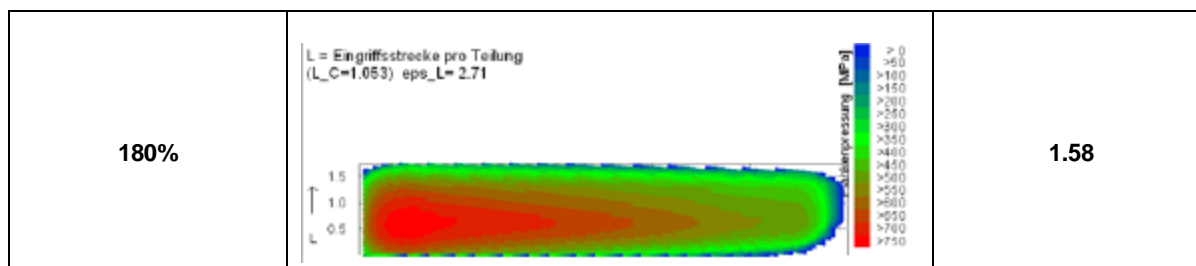
Según la experiencia existe una correlación excelente entre la teoría y la práctica, por lo tanto se estudiará la característica a partir de los datos teóricos.



Como muestra en la tabla 7.6 se estudiarán los dos contactos más sensibles al aumento de carga. Estos serán un contacto de la etapa planetaria y otro de la etapa paralela.

% de Carga del Par Nominal	Contact pattern Etapa Planetaria	Tensión máx / Tensión media
20%	<p>L = Eingriffsstrecke pro Teilung ($L_C=1.053$) $\epsilon_{ps_L}=1.57$</p> 	2.9
40%	<p>L = Eingriffsstrecke pro Teilung ($L_C=1.053$) $\epsilon_{ps_L}=1.92$</p> 	2.07
60%	<p>L = Eingriffsstrecke pro Teilung ($L_C=1.053$) $\epsilon_{ps_L}=2.17$</p> 	1.97
80%	<p>L = Eingriffsstrecke pro Teilung ($L_C=0.684$) $\epsilon_{ps_L}=2.62$</p> 	1.65
100%	<p>L = Eingriffsstrecke pro Teilung ($L_C=0.684$) $\epsilon_{ps_L}=2.32$</p> 	1.29





% de Carga del Par Nominal	Contact pattern Etapa Paralela	Tensión máx / Tensión media
20%	<p>L = path of contact per base pitch (L_C=0.922) eps_L= 3.07</p> <p>load intensity [N/mm]</p>	1.767
40%	<p>L = path of contact per base pitch (L_C=0.922) eps_L= 3.27</p> <p>load intensity [N/mm]</p>	1.58
60%	<p>L = path of contact per base pitch (L_C=0.922) eps_L= 3.37</p> <p>load intensity [N/mm]</p>	1.45
80%	<p>L = path of contact per base pitch (L_C=0.922) eps_L= 3.00</p> <p>flank pressure [MPa]</p>	1.35



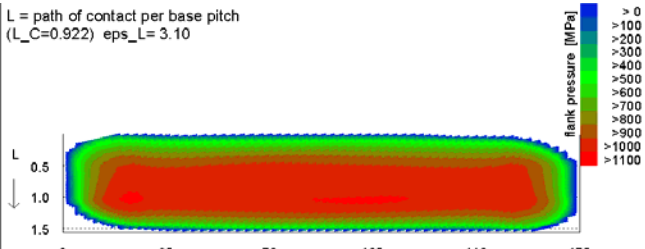

<p>100%</p>	<p>L = path of contact per base pitch (L_C=0.922) eps_L= 3.10</p> 	<p>1.21</p>
<p>180%</p>	<p>L = path of contact per base pitch (L_C=0.922) eps_L= 3.50</p> 	<p>1.28</p>

Tabla 7.6 Evolución de contact pattern

Como se puede observar la tensión máxima entre la tensión media en el caso en el que la carga es del 100% tiene el valor más bajo en ambos casos. Esto hace que la tensión esté mejor distribuida a lo largo del diente. También se puede observar, en el primer caso, el desplazamiento de la máxima tensión de un extremo del diente al otro. En el segundo caso se observa que se va distribuyendo cada vez mejor la carga a lo largo del diente.

Por lo tanto como conclusión se puede mencionar que hasta el 180% de carga respecto la carga nominal no existe un aumento demasiado significativo para limitar el par.

Por lo tanto se limitará el par hasta el 180% del par nominal que es hasta donde se ha calculado la distribución de carga del diente y se observa que trabaja correctamente.



7.1.4. Incremento de la carga en los casos de producción

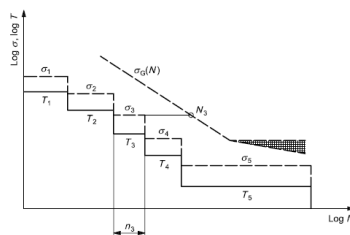
Para conseguir que el ensayo tenga una duración menor se ha de incrementar el par hasta un cierto punto de compromiso para disminuir las horas de trabajo.

Para ello se han de analizar cada uno de los componentes del multiplicador para analizar las pendientes de fatiga de cada uno de ellos.

La normativa ISO 6336-6, explica que para poder hacer equivalencias de daño de un par a otro, es necesario ponderar, de forma exponencial, los ciclos necesarios para generar el mismo daño. Los valores de las pendientes de fatiga (Par – Ciclos) están normalizadas en la norma mencionada anteriormente. La normativa proporciona las pendientes (p) y los ciclos a los que se encuentra el valor de par equivalente, debajo del cual la curva de fatiga se mantiene constante en el tiempo, lo que quiere decir que los ciclos por debajo no producen fatiga.

La formulación básica para conseguir esta ponderación es:

$$T_1^p \cdot n_1 = T_2^p \cdot n_2 \quad (\text{Ec. 7.2})$$



Tratamiento Superficial	Pitting		Bending	
	p	N _L	p	N _L
Case Carburized	6.610	5 x 10 ⁷	8.738	3 x 10 ⁶
Through Hardened	6.610	5 x 10 ⁷	6.225	3 x 10 ⁶
Nitrided	5.709	2 x 10 ⁶	17.035	3 x 10 ⁶
Nitro-Carburized	15.715	2 x 10 ⁶	84.003	3 x 10 ⁶

Tabla 7.7 Parámetros de fatiga, tratamiento superficial

Para observar la importancia de esta traslación de par equivalente, si se asume un tratamiento superficial through hardened, calculado a bending, con un par equivalente a N_L de 1980 kNm y convirtiendo los 3x10⁶ ciclos (equivalente al daño en 20 años) a horas con una velocidad media de 14 rpm a otro par equivalente con la necesidad de 10 veces menos de horas el par resultante es:

$$1980^{6.225} \cdot 3571 = T_2^{6.225} \cdot 3571 / 10 \quad (\text{Ec. 7.3})$$

$$T_2 = 2866 \text{ kNm} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Esto representa que un aumento del 45% representa una disminución del 90% de los ciclos necesarios para generar la misma fatiga.

A modo resumen los datos con las pendientes con las que se estudia el aumento del par en este proyecto son:



			p (-)
Componentes	Rodamientos	Bolas	3
		Rodillos	3,33
	Engranajes	Pitting	6,61
		Bending (Through Hardened)	6,225
		Bending (Case Carburized)	8,738
	Estructural	Porta planetas	8
		Brazo de reacción	10

Input Data	Ti (kNm)	150%
	ni proveedor(h)	1282
	Tj (kNm)	100%
	nj proveedor(h)	16000

			p (-)	nj (h)	nj proveedor vs nj
Componentes	Rodamientos	Bolas	3	4327	369%
		Rodillos	3,33	4946	323%
	Engranajes	Pitting	6,61	15700	102%
		Bending (Through Hardened)	6,225	13998	114%
		Bending (Case Carburized)	8,738	44317	36%



	Estructural	Porta planetas	8	32856	48%
		Brazo de reacción	10	73927	22%

Tabla 7.8 Cálculo horas reducidas en series de producción

Con los datos, ofrecidos por el proveedor, el cual nos proporciona las horas necesarias para fatigar un componente en concreto, haciendo la traslación de par y ciclos se aumenta el par hasta conseguir fatigar los componentes críticos para rodamientos y engranajes. En este caso el valor de corte son las 15700 horas equivalentes para fatigar los engranajes a pitting, ya que por la pendiente a fatiga es la que más ciclos necesita.

Si se tiene en cuenta que el factor importante a simular, acorde a la experiencia, es el engranaje a through hardened, con un factor de fatiga de 6,225 según la normativa ISO-6336-6 y se desea finalmente simular con un factor de incremento del 1,5, se consigue disminuir casi un 92% el tiempo de simulación, haciendo falta 1282 horas para simular los casos de producción que corresponden al 91% de la vida operacional del multiplicador.

Hace falta comentar que la amplitud de las cargas de operación a simular no se amplificará ya que se simularían casos extremadamente altos debido a la corrección de los niveles de fatiga. Por lo tanto solo se multiplicara el par medio por este factor de escala.

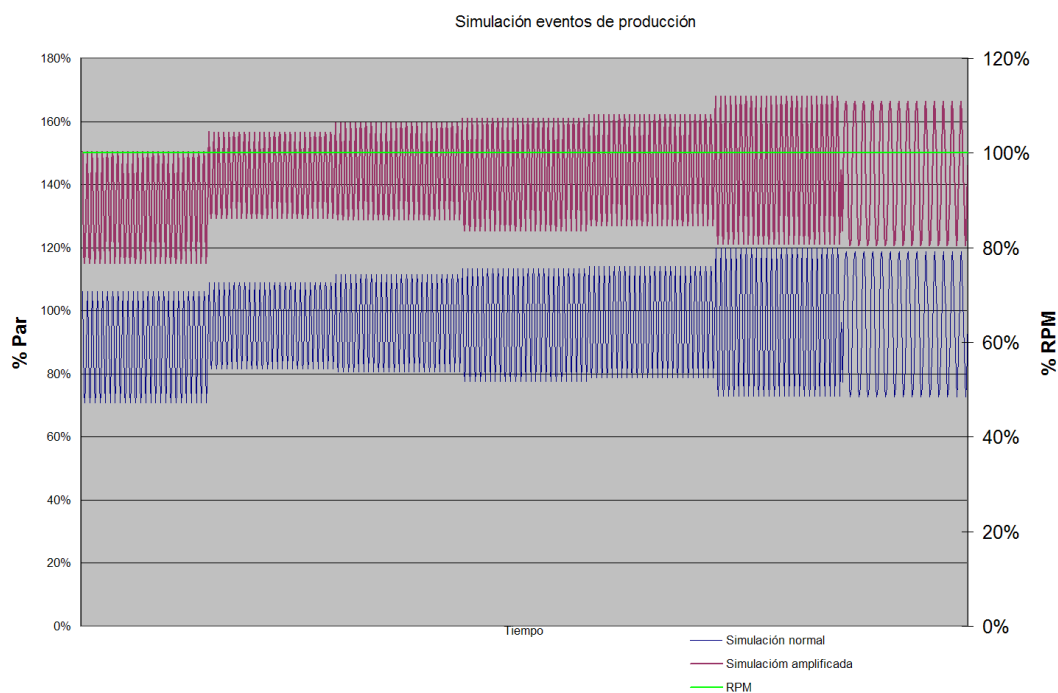


Imagen 7.4 Incremento de par en producción



7.2. Eventos de daño

Los eventos de producción anteriormente descritos se eligieron por el daño que provocan a pitting y bending, pero, aparte de estos daños, durante el proyecto se ha hablado de otros fenómenos que se quieren comprobar, estos son el micropitting, gripado y el fallo en rodamientos.

Para el micropitting es necesario llegar a simular los eventos que produzcan mínima velocidad y máxima carga, mientras que en los rodamientos se necesita simular la máxima velocidad con la mínima carga posible o las máximas aceleraciones. Por último el gripado precisa la simulación de la máxima carga que alcanza el aerogenerador.

Si se crea un envoltorio de escenarios los eventos que son precisos simular son:

- Casos de Idling, donde el aerogenerador gira con poca carga, con el cual simularemos el posible daño de rodamientos y de micropitting.
- Caso extremo de par, donde abarcaremos el daño de gripado y el segundo caso de micropitting.
- Caso de aceleración máxima, para comprobar el deslizamiento de rodamientos.
- Casos de producción de mínimo Par a velocidades de giro moderadas. Se puede encontrar el daño de deslizamiento de rodamientos.

7.2.1. Idling

Los casos de idling o de relentí duran un 6.3% del tiempo total del aerogenerador por lo tanto estudiando los casos de Idling se encuentra lo siguiente:

Serie temporal	% duración
e64-01	1.76%
e64-07	2.90%
e64-15	1.62%
e64-23	0.08%
e64-30	0.04%

Tabla 7.9 Duración de eventos de Idling



Serie temporal	% duración	Par medio [kNm]	Velocidad Media RPM	Ponderación RPM	Ponderación Par
e64-01	1.76%	25.45	0.60	0.01	0.449002568
e64-07	2.90%	65.33	0.65	0.02	1.893121158
e64-15	1.62%	129.63	1.20	0.02	2.095842793
e64-23	0.08%	345.80	1.70	0.00	0.276470815
e64-30	0.04%	731.26	2.10	0.00	0.259844545
				0.05	4.974281879
TOTAL				0.796	77.79

 Tabla 7.10 Parámetros de simulación de Idling


Como la anterior tabla muestra los casos de idling correspondrán a un par constante de:

- 78 kNm a una velocidad de 0.8 rpm durante el 6.3% del tiempo del ensayo.

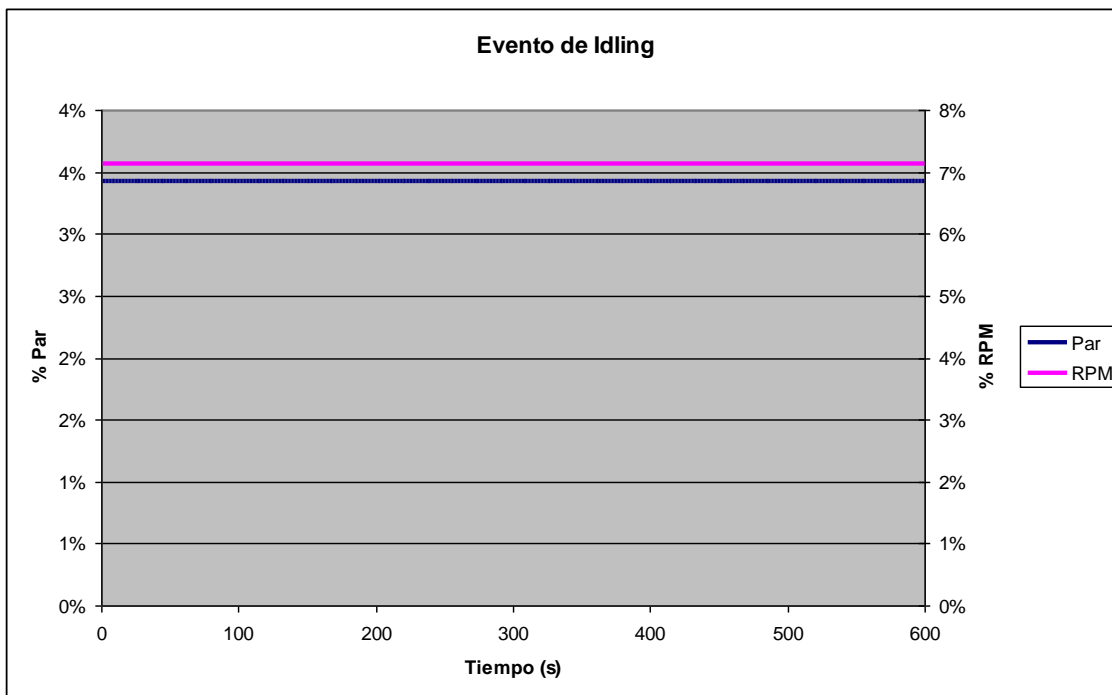


Imagen 8.14 Simulación de eventos de Idling

Los casos de gripado corresponden a un caso extremo, por lo tanto, son un caso no operacional que no ocupa porcentaje del tiempo del total de fatiga y se procede a simularlo completamente por su corta duración.

7.2.2. Par extremo

Este caso corresponde a la simulación de 2,2 veces el par nominal de la máquina durante la duración prevista de la serie temporal. Como ya se estudió antes, aproximadamente, corresponde a la simulación de 1,5 horas a este par extremo.



Por lo tanto la especificación es:

- 1.5 horas a 2,2 veces el par nominal de la máquina.

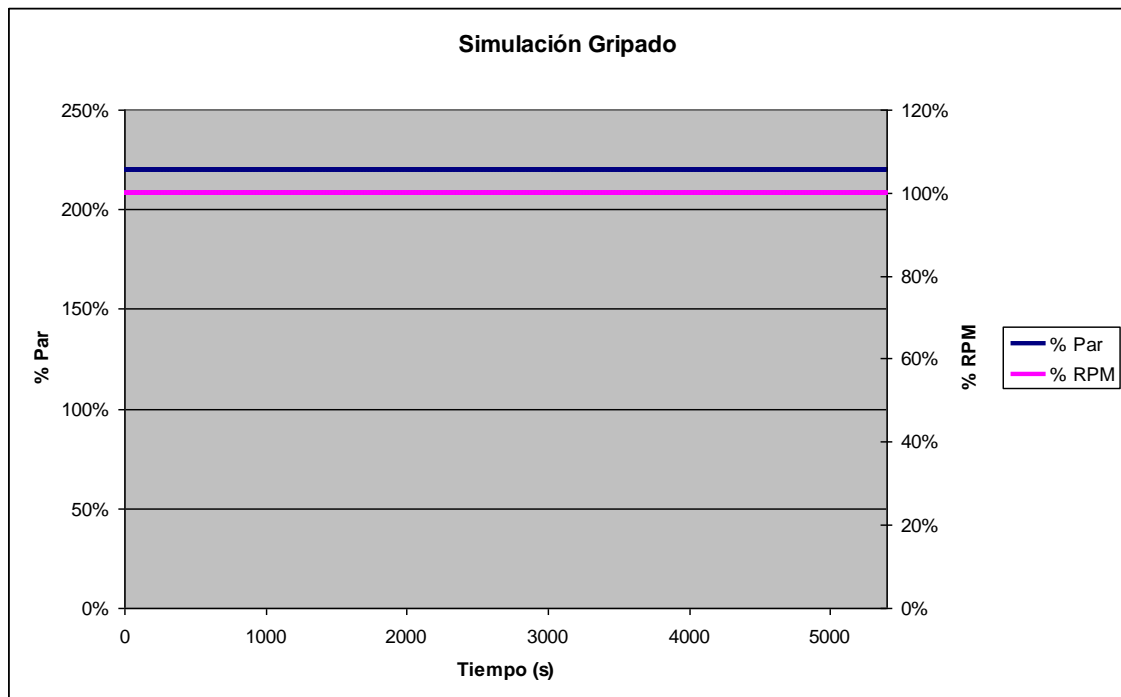


Imagen 7.15 Simulación de gripado



7.2.3. Máxima aceleración

Los casos de máxima aceleración se llevarán a cabo en los eventos especiales de arrancadas.

la máxima aceleración será $0.29 \text{ rad/s}^2 = 0.05 \text{ rev/s}^2 = 3 \text{ rpm / s}$, hasta llegar a la velocidad de 14 rpm, quiere decir que cada arranque durará aproximadamente 4 segundos. Y el número total de arranques será el tiempo de aceleración máxima calculado anteriormente por la duración de cada arranque. Como se ha estudiado anteriormente habrá un total de 54 minutos con esta aceleración durante los 20 años de vida del aerogenerador por lo tanto. Para simular los dos años que se estima recrear, habrá que recrear 80 arrancadas de 4 segundos cada una de ellas partiendo desde una velocidad de 3rpm a 14rpm. Analizando el caso se encuentra que aproximadamente el par es del 50% del nominal.

$$\text{Total de arranques} = \text{Tiempo(h)} \cdot 3600 / 4 \quad (\text{Ec. 7.5})$$

7.3. Eventos especiales

Una vez los casos de producción y de daño han sido recreados se procede a la creación de los eventos especiales. Estos eventos especiales se definen como las arrancadas, paradas, paradas de emergencia o pérdidas de red.

7.3.1. Arrancadas

A continuación se describen los casos de arranque de la máquina con su duración prevista y el tipo de carga y aceleración que se precisará simular.

Gráficamente las arrancadas a lo largo del tiempo tienen un aspecto como los del siguiente gráfico. Se incrementa la velocidad hasta velocidad nominal, una vez alcanzada esta velocidad con el control de las palas se dispondrá a seguir aumentando el par hasta alcanzar potencia nominal.



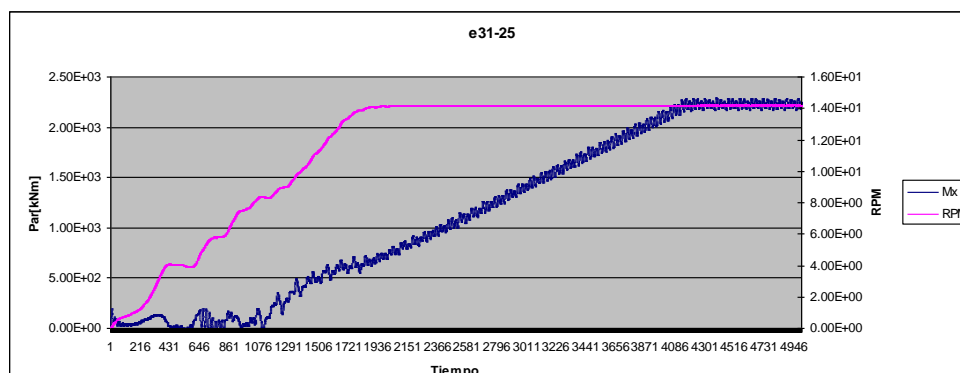


Imagen 7.16 Evento de arrancada e31-25

El aspecto del gráfico de funcionamiento par-velocidad de uno de estos eventos es mostrado en la imagen 7.17:

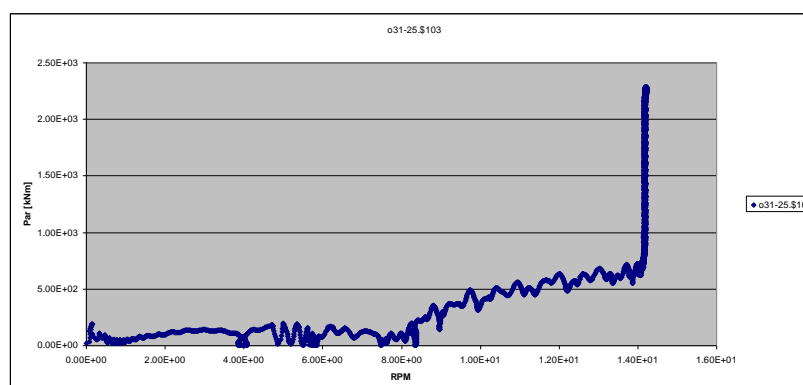


Imagen 7.17 Funcionamiento de arrancada e31-25



Analizando las series temporales, se obtiene el siguiente cuadro resumen de resultados:

Serie temporal	% duración	Velocidad máxima RPM	Aceleración rad/s ²	Par máximo [kNm]	Incremento de Par [kNm/s]	Tiempo hasta RPM máx (s)	Tiempo hasta Par máx (s)
e31-05	0.74%	8.3425	0.02067168	447.401	9.86	42	45.38
e31-11.5	0.04%	13.6715	0.041866958	2320.54	13.4	34.2	173.17
e31-25	0.04%	12.629	0.117442786	2102.39	13.35	11.26	157.5

Tabla 7.11 Parámetros de simulación de arrancadas

Este cuadro expresa la aceleración e incremento de par que se tiene que simular partiendo desde que la máquina está parada, es decir, que la velocidad y par inicial es cero.

Se expresa la duración de cada evento hasta llegar a la velocidad y par nominal, cabe mencionar que como las series son de 250 segundos, los segundos en los que difieren de 250 se mantiene velocidad y par nominal.

También se expresa la duración total según la distribución Weibull. Cada una de las series temporales tiene una duración de 250 segundos, es decir de aproximadamente 4,2 minutos. Si el total de arrancadas es del 0.82% quiere decir que al año hay 430992 minutos de arranque, que corresponden a más de 100.000 arranques al año.

Acorde la experiencia de la empresa se creará un único evento para simular las arrancadas de la máquina. Este evento corresponderá a la serie temporal e31-11.5.

La gráfica de la imagen 7.18 muestra la simulación.



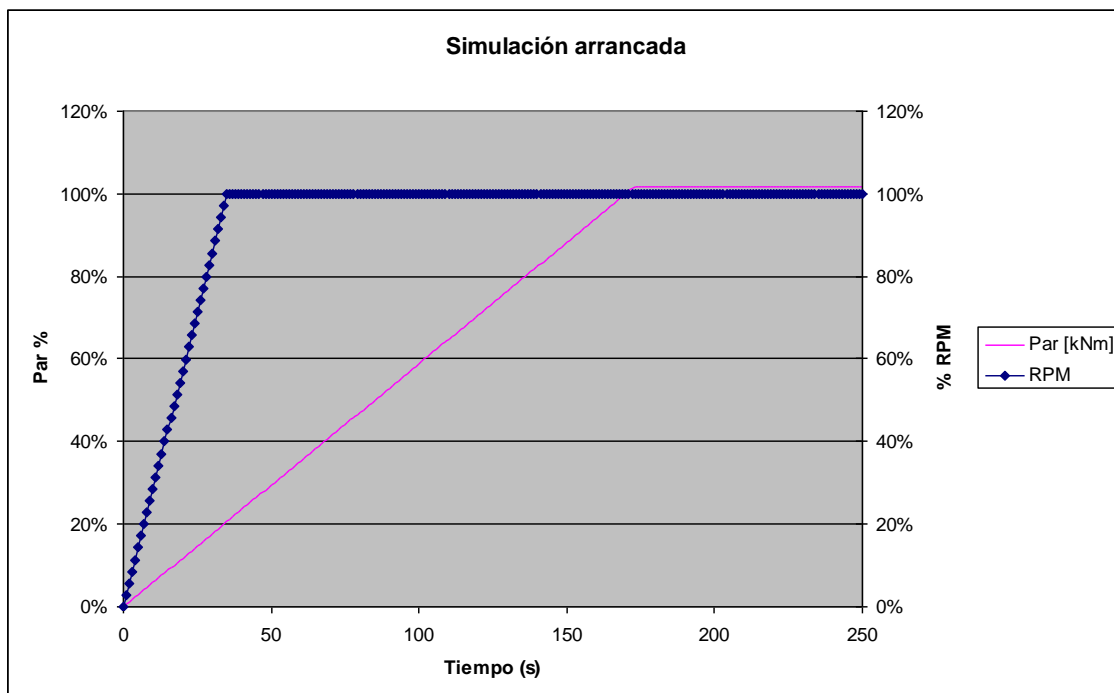


Imagen 7.18 Simulación de arrancadas

Como se ha comentado anteriormente, se introducirá un caso para la aceleración máxima para garantizar que los rodamientos no deslizarán.

7.3.2. Paradas

Existen tres casos de paradas según los casos descritos en la normativa. La representación gráfica en el tiempo y funcionamiento de uno de estos casos es como la que se muestra a continuación:



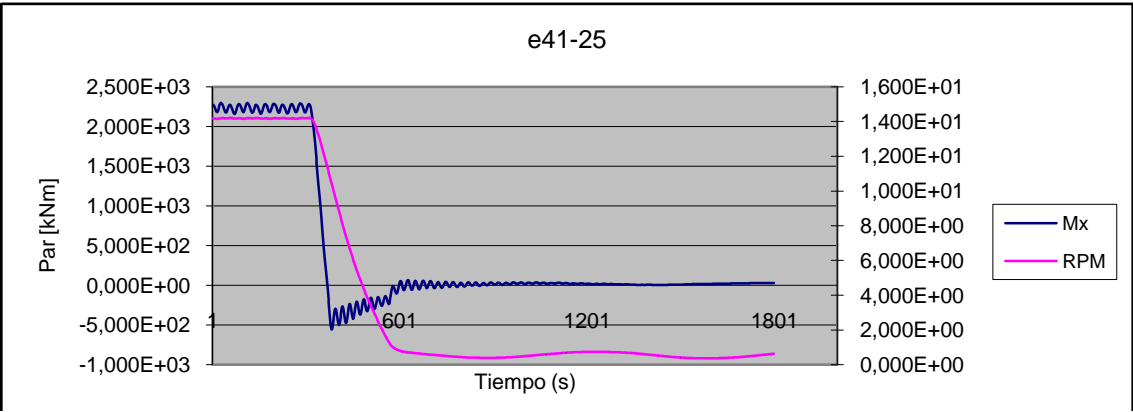


Imagen 7.19 Evento de parada e41-25

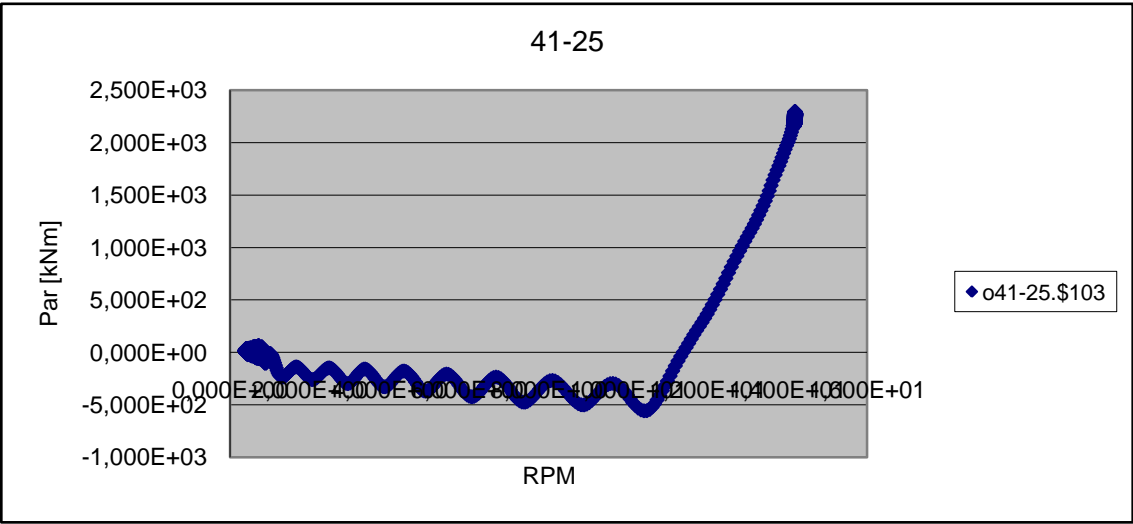


Imagen 7.20 Funcionamiento de parada e41-25



Si analizamos los casos de paradas se encuentran los siguientes datos:

	Serie temporal	% duración	Max Par [kNm]	Máx RPM	Desaceleración (rad/s ²)	Disminución de Par [kNm/s]	Tiempo hasta 0 RPM (s)	Tiempo hasta 0 kNm (s)
Parada	e41-03	0,267%	56,9	7,8	-0,06	-3,00	13,60	19,00
	e41-11.5	0,016%	2319,1	13,7	-0,29	-47,50	4,95	48,80
	e41-25	0,016%	2109,6	12,7	-0,15	-150,00	8,90	14,00

Tabla 7.12 Parámetros de simulación de paradas

Como se ha descrito en el capítulo de las definiciones del tipo de series temporales, los casos de parada tienen una duración de 90 segundos. Esto hace que antes que las rpm lleguen a cero y el par a cero el ensayo ha de funcionar en forma estacionaria en el valor de máximo par de cada una de las series con su velocidad máxima antes de producirse la parada.

De la misma manera que se hizo con las simulaciones de arrancadas, en el evento de las paradas se simulará únicamente el caso e41-11.5. Este evento según la experiencia es el que mejor puede caracterizar este evento ya que se parte desde el par y velocidad nominal hasta la parada de la máquina.

La gráfica de la imagen 7.21 muestra la simulación:



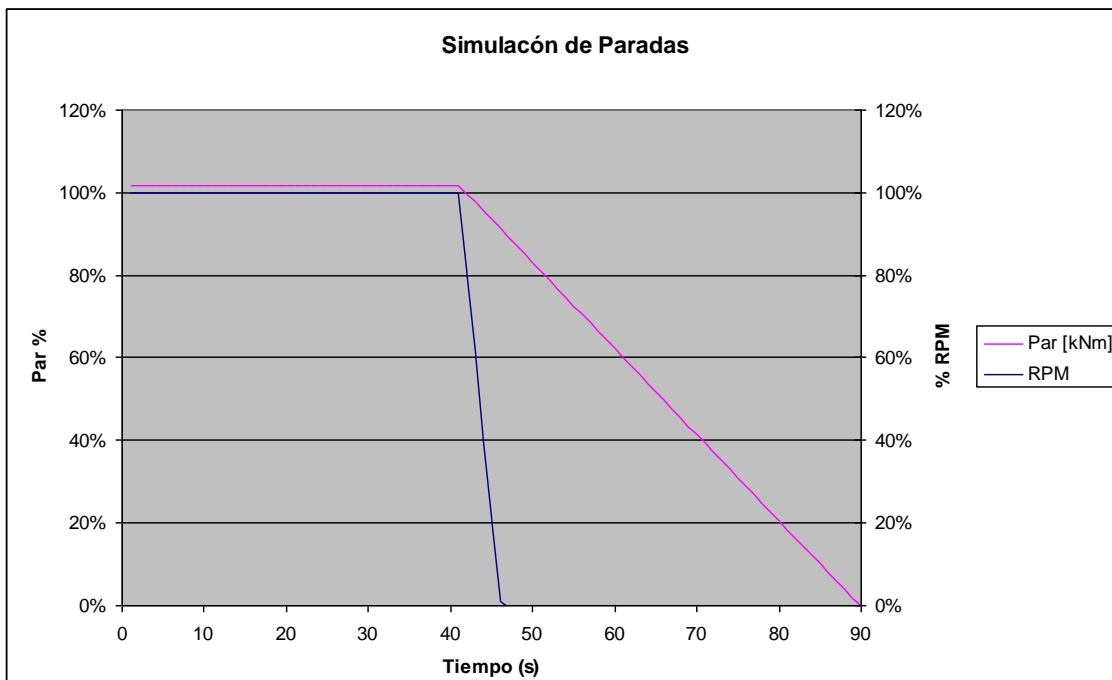


Imagen 7.21 Simulación de paradas

7.3.3. Pérdidas de red

Uno de los eventos más violentos que pueden existir es que el aerogenerador esté funcionando generando energía y la red desconecte de forma inmediata el aerogenerador de la red eléctrica. Esto provoca que el aerogenerador se acelere aumentando incluso su par por la acumulación de inercia en el giro. Entonces el multiplicador funciona como componente resistente y el par mecánico que ve es negativo. El control intenta evitar estas aceleraciones con el ángulo de incidencia de las palas al viento para conseguir parar la máquina, durante este control se crean pares positivos y negativos para conseguir parar la máquina.

La gráfica, de la imagen 7.22, permite ilustrar de forma más fácil este evento.



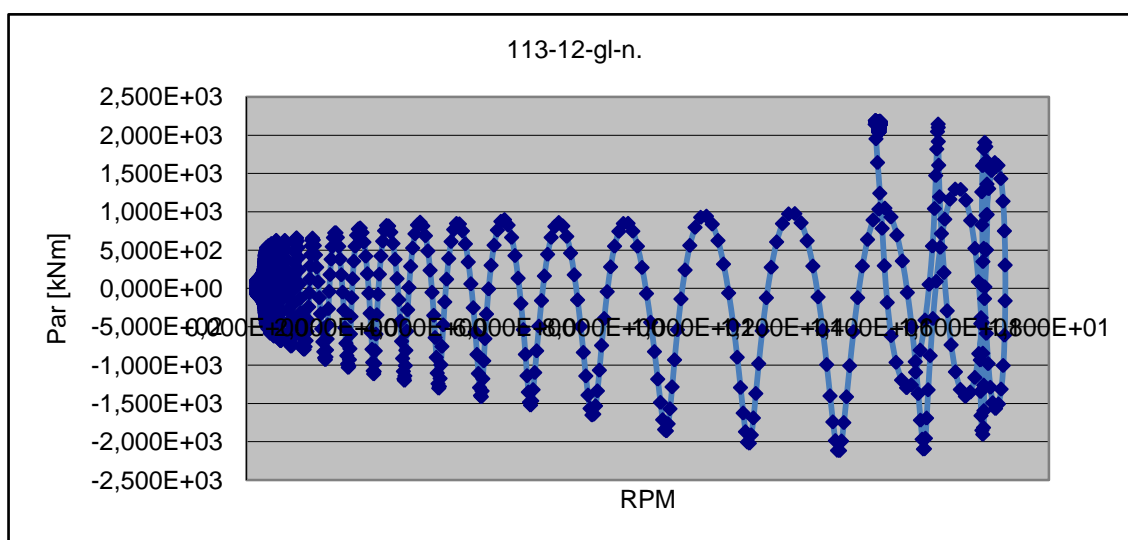
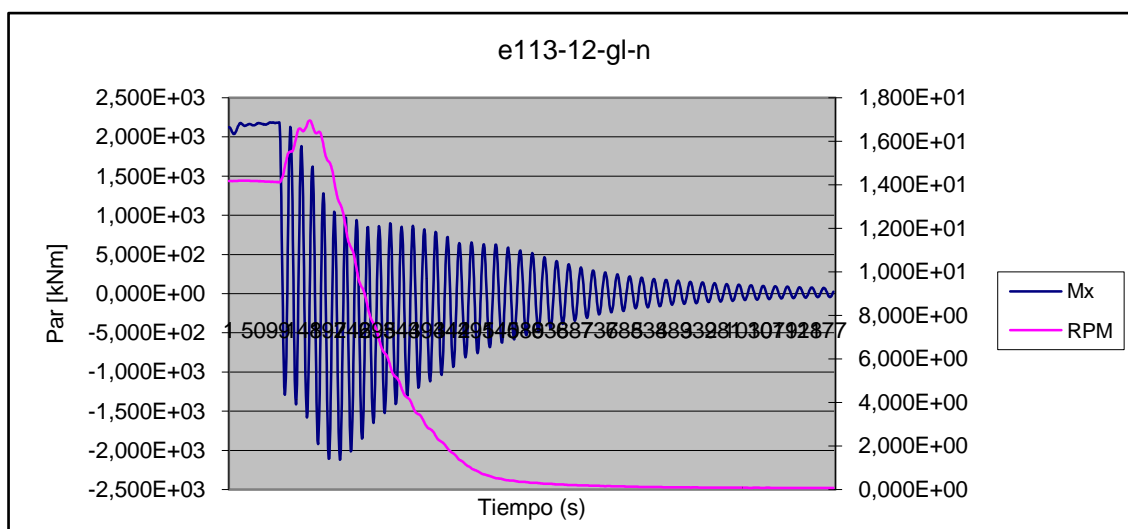


Imagen 7.22 Evento fallo de red 113-12-gl-n



Analizando las series temporales se encuentra:

	Serie temporal	% duración	Max Par [kNm]	Mín. Par [kNm]	Velocidad máx RPM	Velocidad mín. RPM	Aceleración rad/s ²	Desaceleración (rad/s ²)
Pérdida de conexión	e113-11.5	0,002%	2297,6	-2434,3	15,7	0,2	0,17	-0,26
	e113-11.5	0,001%	2286,8	-2429,1	15,6	0,1	0,17	-0,28
	e113-11.5	0,001%	2286,9	-2433,3	15,6	0,2	0,17	-0,25

Tabla 7.13 Parámetros de simulación de pérdidas de red

La importancia de estas series es la aleatoriedad de pares positivos y negativos en el multiplicador. Esta característica es la que se precisará simular en el ensayo sin aumentar el máximo y mínimo valor de par sino tener en cuenta su desviación estándar para crear estos intervalos.

Como los niveles de par, velocidad y aceleraciones son muy parecidos entre ellos, se decide la creación de un solo evento que englobará las tres series temporales para su simulación.

Se usará una velocidad media de 50% de las rpm nominal de forma constante a lo largo del tiempo mientras se simulan las variaciones de par.

Haciendo la envolvente de los tres casos se obtiene la siguiente gráfica, de la imagen 7.23, de simulación:



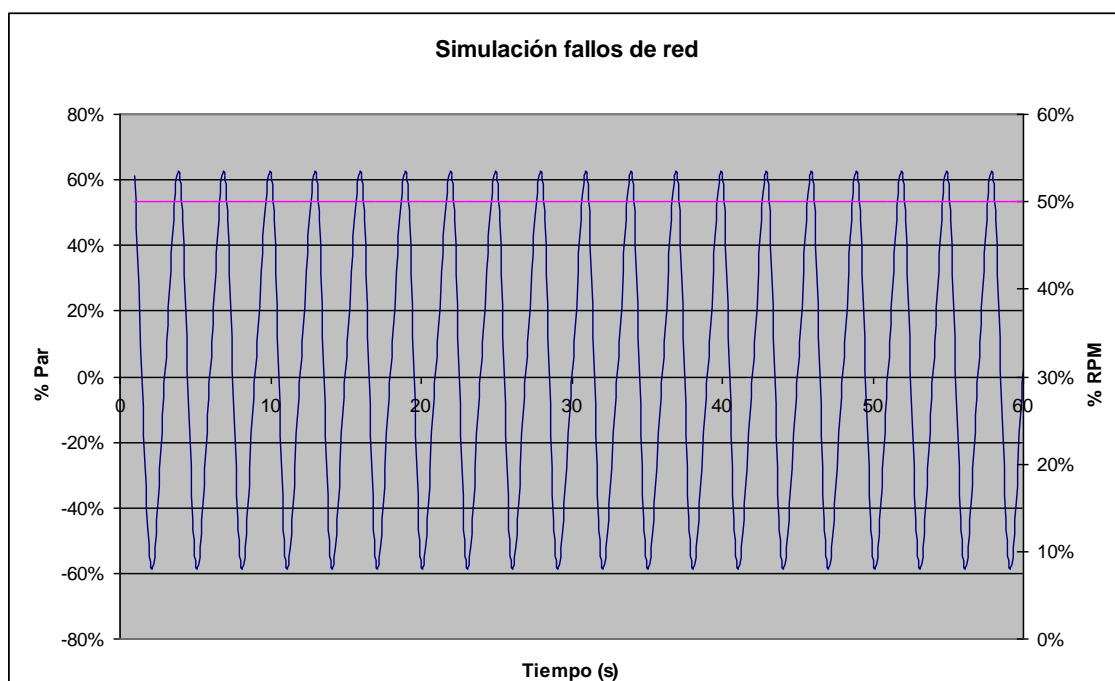


Imagen 7.23 Simulación de fallo de red



8. Series totales para el ensayo y duración total

Una vez todos los eventos a simular han sido creados y teniendo en cuenta la duración total prevista para cada uno de ellos, se elabora una tabla resumen de la propuesta de los eventos a simular y la duración prevista.

Tipo de serie temporal	% Duración total del ensayo	Gráfico / Características
Producción	65.22%	
Producción mínimo Par	26.88%	
Idling	5.3%	



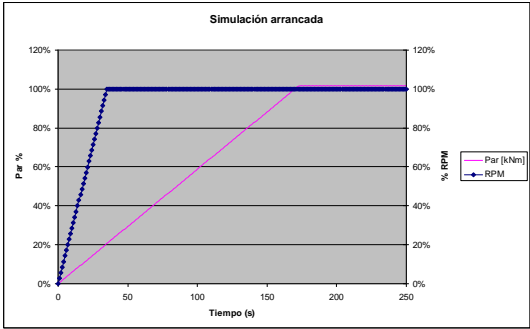
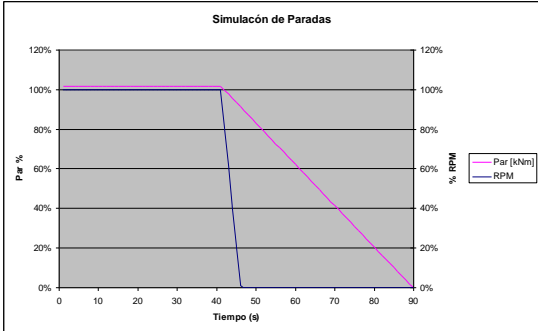
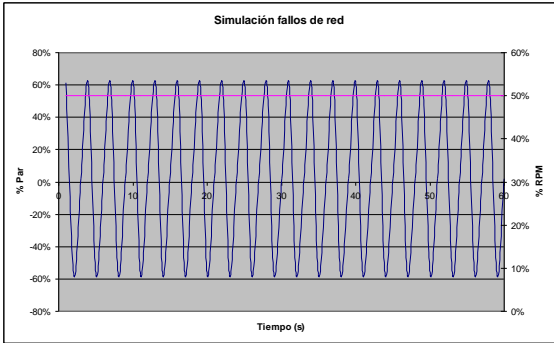
Arrancadas	1%	
Arrancadas máx. aceleración	80 arrancadas	0.29 rad/s ² desde 3rpm hasta 14rpm con un 50 % par nominal
Paradas	0.8%	
Pérdidas de red	0.01%	
Máximo Par	1,5 horas	2,2 veces el par nominal a velocidad nominal

Tabla 8.1 Resumen de simulaciones y tiempo



Para establecer el orden de simulación de eventos se considerará el funcionamiento normal de este tipo de máquinas. Por lo tanto el ensayo partirá con el siguiente orden:

Orden de simulación	Series dependientes	Casos aleatorios hasta completar el tiempo de recreación
Arrancada	X	
Arrancada máx aceleración		X
Producción mínimo par	X	
Producción	X	
Máximo Par		X
Fallo de red		X
Idling	X	
Parada	X	

Tabla 8.2 Flujo de simulación

Los casos de máxima aceleración, máximo par, se intercalaran en medio del ensayo para caracterizar la aleatoriedad de cuando se producen.

El ensayo siempre tendrá que caracterizarse porque se produce una arrancada, se lleva la máquina hasta la serie de producción de mínimo par, luego a la serie de producción nominal, se disminuye las condiciones hasta el caso de idling y se finaliza con una parada.



Como ejemplo práctico, si se decide simular 2 años de funcionamiento de la máquina se obtendría la siguiente distribución:

Caso de simulación	Tiempo del caso (horas)	Tiempo (horas)	Acumulado
• Producción	1282	1282	
• Producción min. Par	805	2087	
• Idling	185	2272	
• Arrancadas	175	2447	
• Arrancadas máx. aceleración	0.1	2447.1	
• Paradas	140	2587.1	
• Pérdidas de red	1.75	2588.75	
• Máximo Par	1.5	2590.25	
TOTAL	-	2590.25	

Tabla 8.3 Ejemplo de duración

Lo que quiere decir un total de 2590.25 horas (3,6 meses) de ensayo recrearían el daño de 2 años del multiplicador.



9. Discusiones

9.1.1. Problemas de la normativa de cálculo de bending y pitting

Este proyecto se basa y se respalda en la normativa de cálculo de la ISO-6336 para el cálculo de vida de engranajes. Ésta normativa de cálculo engloba muchos factores de diseño y cálculo de engranajes, como los materiales, correcciones, perfiles e incluso efectos dinámicos o de aplicación.

Pero el apartado de cálculo de la vida o el cálculo de par equivalente para encontrar el factor de seguridad de un engranaje no es del todo fiable.

Sí únicamente se basara el proyecto en las cargas encontradas por la metodología de la ISO, el 99% de afectación de daño a un par equivalente vendría dado por las series temporales de producción, es decir, cuando el aerogenerador trabaja a plena potencia o en condiciones nominales.

Lo que se pretende, es encontrar un conjunto de cargas que modelase el comportamiento de las cargas del viento reales, las cuales, se simulen en un ensayo para identificar realmente el daño sobre engranajes. En cambio, en el apartado de cálculo no existen criterios, de aceleraciones máximas, velocidades máximas de funcionamiento, aceleraciones inerciales de par, etc...

Es por eso, que desde un punto de vista crítico, se identificarán los puntos sobre la gráfica de funcionamiento que pueden provocar daños de impactos o deslizamientos que la normativa no contempla. Estos casos son:

- Máximas aceleraciones, las cuales pueden provocar daño por impactos debido al juego interdental.
- Fluctuaciones de carga en pares positivos y negativos en poco tiempo, simulando falladas en la red.
- Casos de mínima velocidad, en los cuales la película de lubricante disminuye provocando un mayor rozamiento entre flancos de dientes.
- Simular el máximo nivel de par negativo, cuando el multiplicador hace de par resistente.
- Simular el caso extremo para encontrar un posible gripado, dónde se identificara en la serie temporal extrema, el máximo par con su duración a ser simulada.



9.1.2. El banco dinámico

Es necesaria la especificación de bancos capaces de soportar estas variaciones de velocidad y par. Para ello es necesario discutir la necesidad de la creación de un banco nuevo para la empresa, lo cual, representaría una inversión millonaria, o bien, encontrar una empresa que pueda ofrecer esta maquinaria y alquilarla. Ésta última opción es la que actualmente se utiliza.

Actualmente, existen empresas que hayan creado un banco dinámico como son Hansen, Renk o Ricardo. Esto requiere la necesidad de un contacto con ellos para identificar cuáles son las características de sus bancos para regenerar una nueva especificación de ensayo si estas no fueran capaces de simular los eventos de simulación creados.



10. Impacto ambiental

El proyecto se ha elaborado en las oficinas de una empresa. El trabajo se ha realizado en un ordenador, des del cual se ha buscado información, se han analizado y creado herramientas y se han post-procesado resultados.

El impacto ambiental en la creación de dicho proyecto, ha supuesto el gasto energético de electricidad debido a iluminación, ordenador, teléfono, ventilación y calefacción, así como también de todos los consumibles de papel, bolígrafos y tinta de impresora que se han utilizado para ir presentando informes intermedios o para poder debatir aspectos en reuniones.

Si el ensayo que se ha especificado se llevara a la práctica, se podría conseguir una disminución de fallos en las multiplicadoras de los aerogeneradores, por lo consiguiente un ahorro de material por el reemplazamiento de dichos componentes y poder incrementar el tiempo de disponibilidad de los aerogeneradores produciendo energía eléctrica procedente de una fuente renovable y de esta manera disminuir el consumo de fuentes no renovables.

Si se supone un aerogenerador de 3MW de potencia nominal y un incremento del 15% de disponibilidad en los 20 años que durará la máquina, se puede obtener el siguiente ahorro de CO₂ considerando que sería necesaria energía térmica para generar la energía que no se produce con la energía eólica.

Parámetros para el cálculo:

Aerogenerador: 3000 kW

Factor de utilización (FU): 13%

Rendimiento de la caldera (η_c): 35%

Emisiones específicas de Fuel-Oil ($E_{e_{Fuel-Oil}}$): 0'9 kgCO₂/kWh

Resultado

$$E_{\text{aerogenerador 20 años}} = 3000 \cdot 20 \cdot 24 \cdot 365 \cdot FU \quad (\text{Ec. 10.1})$$

$$E_{\text{aerogenerador 20 años}} = 68328000 \text{ kWh} \quad (\text{Ec. 10.2})$$

$$E_{\text{aerogenerador 20 años}} = E_{\text{Térmica 20 años}} \quad (\text{Ec. 10.3})$$

$$E_{\text{Caldera 20 años}} = E_{\text{Térmica 20 años}} / \eta_c \quad (\text{Ec. 10.4})$$



$$E_{\text{Caldera 20 años}} = 68328000 / 0'35 = 195222857 \text{ kWh} \quad (\text{Ec. 10.5})$$

$$\text{Emisiones de CO}_2 = E_{\text{Fuel-Oil}} \cdot E_{\text{caldera}} \quad (\text{Ec. 10.6})$$

$$\text{Emisiones de CO}_2 = 195222857 \cdot 0'9 = 175700571 \text{ kgCO}_2 = \mathbf{175700,57 \cdot 10^3 \text{ kgCO}_2} \quad (\text{Ec. 10.7})$$

Por lo tanto un incremento de un 15% de la energía producida por el aerogenerador supondría un decremento del 15% de las emisiones de CO₂ que corresponderían a una reducción de la emisión de CO₂ en 20 años de **26355 · 10³ kg CO₂**



11. Presupuesto

Por lo que refiere al presupuesto de este proyecto, como creación de la especificación técnica, se especifican los gastos asociados a dicho proyecto, en términos de, coste por hora de un becario de ingeniería industrial y de ingeniero superior para la supervisión de tareas, en términos de licencia de uso de los software utilizados para el análisis y creación de herramientas, el alquiler de puesto de trabajo con los gastos de ordenador, teléfono y gasto eléctrico utilizado y finalmente la compra de las normativas utilizadas para el diseño del multiplicador.

El coste total para la elaboración de éste proyecto es de 13870.9 € con el 18% IVA Incluido.

	Horas	Precio/Hora	coste
	h	€/h	€
Horas Becario	650	10	6500
Horas Ingeniero	35	60	2100
Material oficina	-	-	125
Gastos de despacho durante 5 meses	-	-	1750
Amortización de ordenador e impresora durante 5 meses	-	-	380
Teléfono 5 meses	-	-	175
Internet 5 meses	-	-	100
Bladed licencia 2 meses	-	-	95
Office licencia 5 meses	-	-	160
Normativas	-	-	370
Total sin IVA	-	-	11755
Total con IVA (+18 %)	-	-	13870.9

Tabla 11.1 Resumen de costes



Conclusiones

Una vez finalizado el proyecto, se ha conseguido encontrar una nueva metodología que mejora el estándar de ensayo que actualmente se utiliza. Comparando la nueva metodología, válida para cualquier tipo de reductora o multiplicadora, se observa que:

- Un ensayo de multiplicadoras en estacionario, como en los que actualmente se ensayan, no recrea las condiciones de funcionamiento de una multiplicadora en la realidad.
- El ensayo dinámico permite reproducir las condiciones de funcionamiento características del multiplicador, tanto la producción normal con transitorios como eventos de paradas, arrancadas o pérdidas de red.
- Con la especificación de ensayo se logran abordar los modos de fallo más característicos y no simplemente los especificados en la ISO-6336.

Una conclusión muy importante es la necesidad de recrear aquellas condiciones, en las cuales, la multiplicadora es propensa a manifestar un modo de fallo que ocurre con frecuencia, por eso con este punto se concluye que:

- Es necesario la recreación de dicho ensayo para garantizar que un modo de fallo no viene inducido por otro modo de fallo previo. Como es el caso del pitting originado por un micropitting debido a la lubricación.
- Un gran aumento de par, respecto al nominal, en los ensayos estacionarios actuales, para disminuir los ciclos necesarios a fatiga, puede generar un contacto entre dientes o unos niveles de vibración de funcionamiento que nunca se darían en la realidad, por lo tanto no es simulado correctamente.
- El aumento de par no es más restrictivo para todos los modos de fallo, por lo tanto, en los ensayos estacionarios un aumento considerable de par puede estar ayudando a que un modo de fallo, que en la realidad puede ocurrir, no se recreé en el ensayo.

Finalmente una vez se han analizado todos los casos de carga, se observa los niveles máximos y transitorios de par y velocidad que se tienen que poder recrear por ello se concluye que:

- Es necesario un banco de ensayo que permita, las fuertes aceleraciones y variaciones de par en un tiempo determinado, según marca la especificación.
- En el caso que no se pueda disponer de un banco dinámico, se pueden añadir los casos de producción a mínimo par y velocidad de conexión, idling y par extremo para garantizar al menos que los rodamientos, el micropitting y el scuffing no se producen, ya que estos casos no precisan de variaciones de velocidad o par en el tiempo.



Agradecimientos

Agradezco a la empresa Alstom Wind S.L. la oportunidad de poder trabajar con ellos y toda la información que abiertamente me han proporcionado para ayudarme a generar este proyecto, sin ella, no hubiera sido posible profundizar tanto en aspectos realmente importantes.

Agradezco a mis padres Guillermo y Esther, a mi familia y amigos el apoyo, alegría y motivación incondicional que me han aportado a lo largo de todos mis estudios universitarios. Sin ellos todo hubiera sido mucho más difícil.

Agradezco mucho a mi responsable Daniel Garcia y a mis compañeros de trabajo Xavier Soler, Samuel Segura, Javier Checa y Santiago Claramunt el trato y ánimos recibidos a lo largo de estos dos años de trabajo, así como, cada una de las horas invertidas en mi formación. Gracias a ellos mi inserción laboral y aprendizaje ha sido más fácil. Su ayuda ha sido la guía necesaria para afrontar nuevos retos.

También agradezco a mi ponente Xavier Escaler la ayuda y dedicación hacia este proyecto, así como la abierta disponibilidad para indicarme y enseñarme las pautas a seguir.



Bibliografía

- Guideline for the Certification of Wind Turbines. Edición 2003
- Alec Stokes: Gear handbook design and calculations 1st ED.:1992
- ISO 6336 Calculation of load capacity of spur and helical gears. Edición 2006
- ISO-IEC 61400-4 Design requirements for wind turbine gearboxes. Edición 2009
- ISO-76 Rolling bearings-Static load ratings. Edición 2008
- ISO-281 Rolling bearings-Dynamic load ratings and rating life. Edición 2008
- ISO TS 16281 2008_288050_206 Methods for calculation the modified reference rated life for universally loaded bearings. Edicion 2008
- VDI 3839 part 1. Instructions on measuring and interpreting the vibrations of machines. Edición 2001
- DIN-3990-4 Calculation of load capacity of cylindrical gears. Calculation of scuffing resistance. 2006
- ANSI AGMA 6123-b06 2006 Design Manual for Enclosed epicyclic Gear Drives
- ISO 10825 Wear and Damage to Gear teeth – Terminology
- ISO-TR 15144-1 Calculation of micropitting load capacity of cylindrical spur and helical gear
- ISO-TR 15144-1 Calculation of micropitting load capacity of cylindrical spur and helical gear
- VDI 2737 Calculation load capacity tooth root in internal toothings with influence of the gear rim 2006
- Hansen Dorote Concept. URL [<http://www.eurekamagazine.co.uk/article/33693/New-challenges-met-by-gearboxes-for-larger-wind-turbines.aspx>]
- Meeusen_Wim-Hansen presentation de DriveTrain Concepts for WindTurbines-Bremen'11. Bremen 2011
- Martin O.L.Hansen: AERODYNAMICS OF WIND TURBINES 2ND ED.:2008
- Catálogo SKF. General catalogue. Edición 2010



Bibliografía complementaria

- G. Fabregat Balboa. CAL-014.101 scuffing spreadsheet. Barcelona 2010
- G. Fabregat Balboa. CAL-014.102 Micropitting Spreadsheet Barcelona 2011
- G. Fabregat Balboa. CAL-014.103 Bearing frictional moment calculation Barcelona 2011
- G. Fabregat Balboa. CAL-014.104 loads classification LTS to LDD Barcelona 2010
- G. Fabregat Balboa. Macro Gráficos Mx-rpm Barcelona 2011
- G. Fabregat Balboa. Gearbox and bearings loads calculations
- G. Fabregat Balboa, D. Garcia. Macro_Extremas_Multi Barcelona 2011
- Alstom Wind. ECOFAT. Software para el cálculo de pares equivalentes. Barcelona 2010
- Fotografías de daños extraídas de los cursos de fallo de rodamientos y de engranajes de SKF y KissSoft correspondientemente. Año 2011

